



This is a digital copy of a book that was preserved for generations on library shelves before it was carefully scanned by Google as part of a project to make the world's books discoverable online.

It has survived long enough for the copyright to expire and the book to enter the public domain. A public domain book is one that was never subject to copyright or whose legal copyright term has expired. Whether a book is in the public domain may vary country to country. Public domain books are our gateways to the past, representing a wealth of history, culture and knowledge that's often difficult to discover.

Marks, notations and other marginalia present in the original volume will appear in this file - a reminder of this book's long journey from the publisher to a library and finally to you.

Usage guidelines

Google is proud to partner with libraries to digitize public domain materials and make them widely accessible. Public domain books belong to the public and we are merely their custodians. Nevertheless, this work is expensive, so in order to keep providing this resource, we have taken steps to prevent abuse by commercial parties, including placing technical restrictions on automated querying.

We also ask that you:

- + *Make non-commercial use of the files* We designed Google Book Search for use by individuals, and we request that you use these files for personal, non-commercial purposes.
- + *Refrain from automated querying* Do not send automated queries of any sort to Google's system: If you are conducting research on machine translation, optical character recognition or other areas where access to a large amount of text is helpful, please contact us. We encourage the use of public domain materials for these purposes and may be able to help.
- + *Maintain attribution* The Google "watermark" you see on each file is essential for informing people about this project and helping them find additional materials through Google Book Search. Please do not remove it.
- + *Keep it legal* Whatever your use, remember that you are responsible for ensuring that what you are doing is legal. Do not assume that just because we believe a book is in the public domain for users in the United States, that the work is also in the public domain for users in other countries. Whether a book is still in copyright varies from country to country, and we can't offer guidance on whether any specific use of any specific book is allowed. Please do not assume that a book's appearance in Google Book Search means it can be used in any manner anywhere in the world. Copyright infringement liability can be quite severe.

About Google Book Search

Google's mission is to organize the world's information and to make it universally accessible and useful. Google Book Search helps readers discover the world's books while helping authors and publishers reach new audiences. You can search through the full text of this book on the web at <http://books.google.com/>



A propos de ce livre

Ceci est une copie numérique d'un ouvrage conservé depuis des générations dans les rayonnages d'une bibliothèque avant d'être numérisé avec précaution par Google dans le cadre d'un projet visant à permettre aux internautes de découvrir l'ensemble du patrimoine littéraire mondial en ligne.

Ce livre étant relativement ancien, il n'est plus protégé par la loi sur les droits d'auteur et appartient à présent au domaine public. L'expression "appartenir au domaine public" signifie que le livre en question n'a jamais été soumis aux droits d'auteur ou que ses droits légaux sont arrivés à expiration. Les conditions requises pour qu'un livre tombe dans le domaine public peuvent varier d'un pays à l'autre. Les livres libres de droit sont autant de liens avec le passé. Ils sont les témoins de la richesse de notre histoire, de notre patrimoine culturel et de la connaissance humaine et sont trop souvent difficilement accessibles au public.

Les notes de bas de page et autres annotations en marge du texte présentes dans le volume original sont reprises dans ce fichier, comme un souvenir du long chemin parcouru par l'ouvrage depuis la maison d'édition en passant par la bibliothèque pour finalement se retrouver entre vos mains.

Consignes d'utilisation

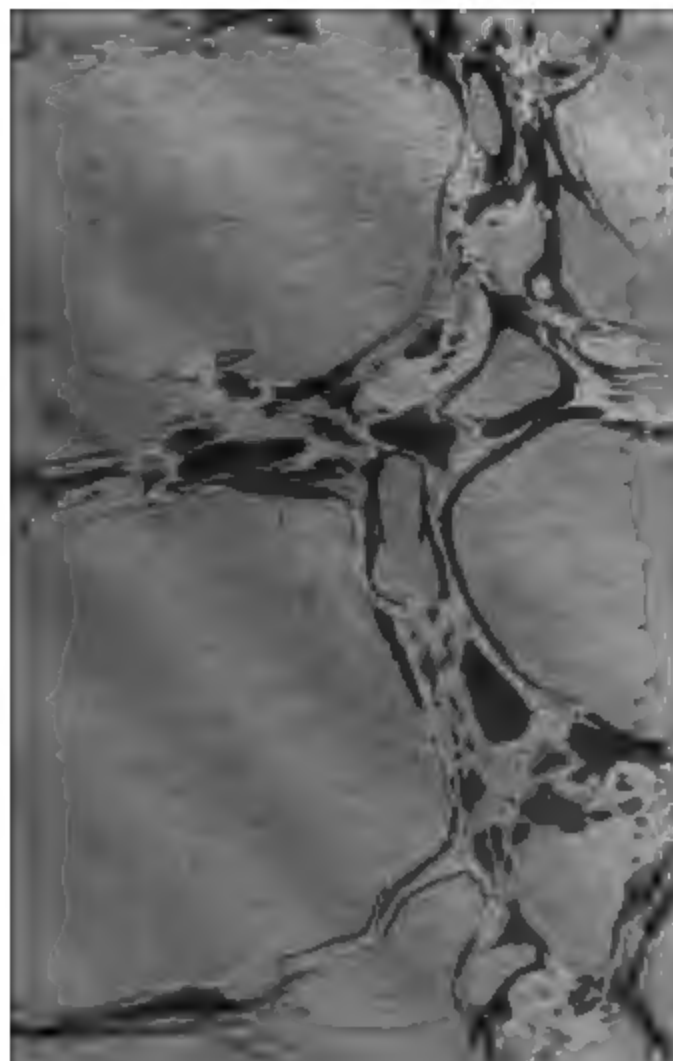
Google est fier de travailler en partenariat avec des bibliothèques à la numérisation des ouvrages appartenant au domaine public et de les rendre ainsi accessibles à tous. Ces livres sont en effet la propriété de tous et de toutes et nous sommes tout simplement les gardiens de ce patrimoine. Il s'agit toutefois d'un projet coûteux. Par conséquent et en vue de poursuivre la diffusion de ces ressources inépuisables, nous avons pris les dispositions nécessaires afin de prévenir les éventuels abus auxquels pourraient se livrer des sites marchands tiers, notamment en instaurant des contraintes techniques relatives aux requêtes automatisées.

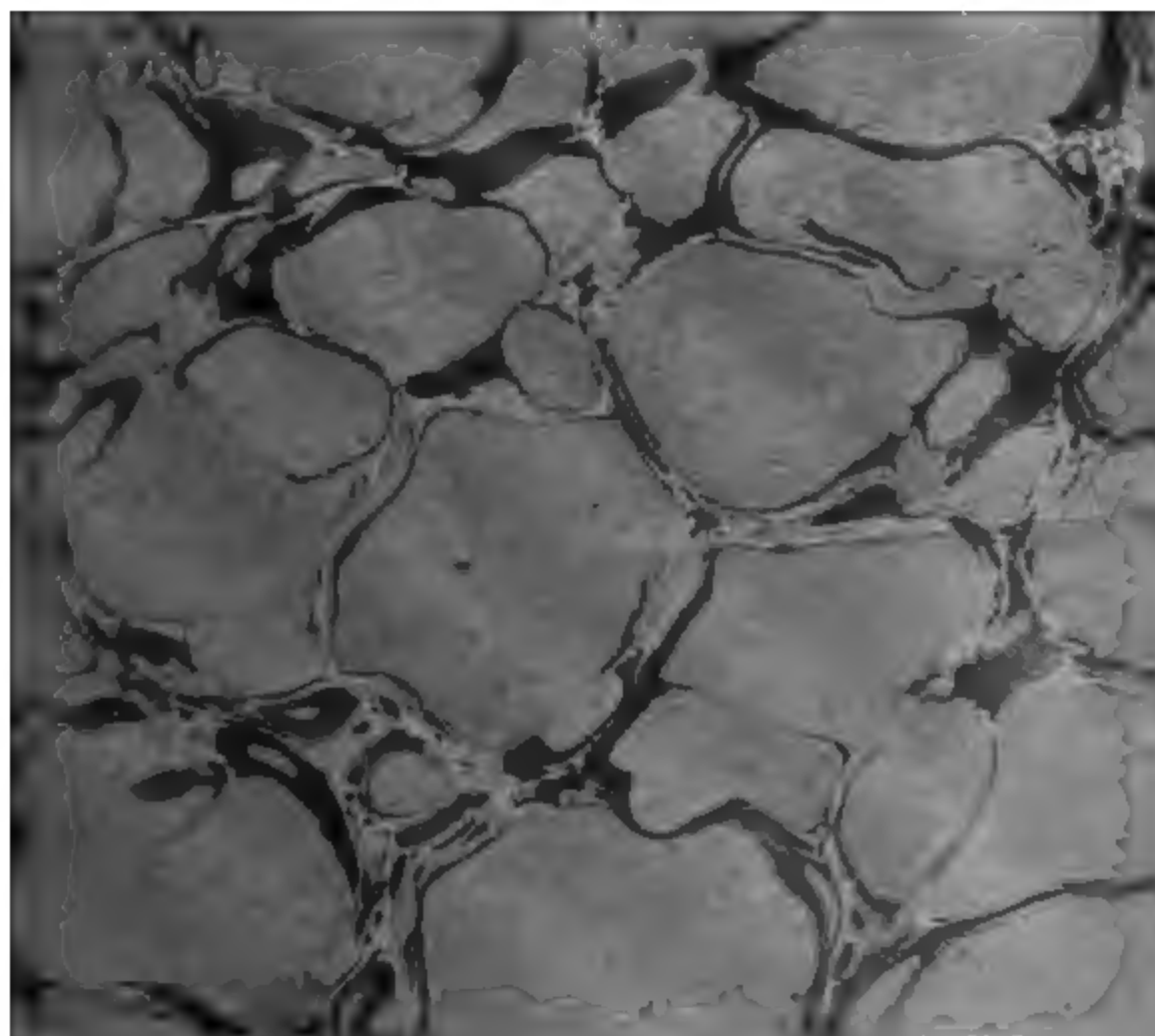
Nous vous demandons également de:

- + *Ne pas utiliser les fichiers à des fins commerciales* Nous avons conçu le programme Google Recherche de Livres à l'usage des particuliers. Nous vous demandons donc d'utiliser uniquement ces fichiers à des fins personnelles. Ils ne sauraient en effet être employés dans un quelconque but commercial.
- + *Ne pas procéder à des requêtes automatisées* N'envoyez aucune requête automatisée quelle qu'elle soit au système Google. Si vous effectuez des recherches concernant les logiciels de traduction, la reconnaissance optique de caractères ou tout autre domaine nécessitant de disposer d'importantes quantités de texte, n'hésitez pas à nous contacter. Nous encourageons pour la réalisation de ce type de travaux l'utilisation des ouvrages et documents appartenant au domaine public et serions heureux de vous être utile.
- + *Ne pas supprimer l'attribution* Le filigrane Google contenu dans chaque fichier est indispensable pour informer les internautes de notre projet et leur permettre d'accéder à davantage de documents par l'intermédiaire du Programme Google Recherche de Livres. Ne le supprimez en aucun cas.
- + *Rester dans la légalité* Quelle que soit l'utilisation que vous comptez faire des fichiers, n'oubliez pas qu'il est de votre responsabilité de veiller à respecter la loi. Si un ouvrage appartient au domaine public américain, n'en déduisez pas pour autant qu'il en va de même dans les autres pays. La durée légale des droits d'auteur d'un livre varie d'un pays à l'autre. Nous ne sommes donc pas en mesure de répertorier les ouvrages dont l'utilisation est autorisée et ceux dont elle ne l'est pas. Ne croyez pas que le simple fait d'afficher un livre sur Google Recherche de Livres signifie que celui-ci peut être utilisé de quelque façon que ce soit dans le monde entier. La condamnation à laquelle vous vous exposeriez en cas de violation des droits d'auteur peut être sévère.

À propos du service Google Recherche de Livres

En favorisant la recherche et l'accès à un nombre croissant de livres disponibles dans de nombreuses langues, dont le français, Google souhaite contribuer à promouvoir la diversité culturelle grâce à Google Recherche de Livres. En effet, le Programme Google Recherche de Livres permet aux internautes de découvrir le patrimoine littéraire mondial, tout en aidant les auteurs et les éditeurs à élargir leur public. Vous pouvez effectuer des recherches en ligne dans le texte intégral de cet ouvrage à l'adresse <http://books.google.com>





24

Enje-

Gar:

D42

2. 2. 2.

116. 2. 1. 2. 3. 4. 5. 6. 7. 8. 9. 10. 11. 12. 13. 14. 15. 16. 17. 18. 19. 20. 21. 22. 23. 24. 25. 26. 27. 28. 29. 30. 31. 32. 33. 34. 35. 36. 37. 38. 39. 40. 41. 42. 43. 44. 45. 46. 47. 48. 49. 50. 51. 52. 53. 54. 55. 56. 57. 58. 59. 60. 61. 62. 63. 64. 65. 66. 67. 68. 69. 70. 71. 72. 73. 74. 75. 76. 77. 78. 79. 80. 81. 82. 83. 84. 85. 86. 87. 88. 89. 90. 91. 92. 93. 94. 95. 96. 97. 98. 99. 100. 101. 102. 103. 104. 105. 106. 107. 108. 109. 110. 111. 112. 113. 114. 115. 116. 117. 118. 119. 120. 121. 122. 123. 124. 125. 126. 127. 128. 129. 130. 131. 132. 133. 134. 135. 136. 137. 138. 139. 140. 141. 142. 143. 144. 145. 146. 147. 148. 149. 150. 151. 152. 153. 154. 155. 156. 157. 158. 159. 160. 161. 162. 163. 164. 165. 166. 167. 168. 169. 170. 171. 172. 173. 174. 175. 176. 177. 178. 179. 180. 181. 182. 183. 184. 185. 186. 187. 188. 189. 190. 191. 192. 193. 194. 195. 196. 197. 198. 199. 200. 201. 202. 203. 204. 205. 206. 207. 208. 209. 210. 211. 212. 213. 214. 215. 216. 217. 218. 219. 220. 221. 222. 223. 224. 225. 226. 227. 228. 229. 230. 231. 232. 233. 234. 235. 236. 237. 238. 239. 240. 241. 242. 243. 244. 245. 246. 247. 248. 249. 250. 251. 252. 253. 254. 255. 256. 257. 258. 259. 260. 261. 262. 263. 264. 265. 266. 267. 268. 269. 270. 271. 272. 273. 274. 275. 276. 277. 278. 279. 280. 281. 282. 283. 284. 285. 286. 287. 288. 289. 290. 291. 292. 293. 294. 295. 296. 297. 298. 299. 300. 301. 302. 303. 304. 305. 306. 307. 308. 309. 310. 311. 312. 313. 314. 315. 316. 317. 318. 319. 320. 321. 322. 323. 324. 325. 326. 327. 328. 329. 330. 331. 332. 333. 334. 335. 336. 337. 338. 339. 340. 341. 342. 343. 344. 345. 346. 347. 348. 349. 350. 351. 352. 353. 354. 355. 356. 357. 358. 359. 360. 361. 362. 363. 364. 365. 366. 367. 368. 369. 370. 371. 372. 373. 374. 375. 376. 377. 378. 379. 380. 381. 382. 383. 384. 385. 386. 387. 388. 389. 390. 391. 392. 393. 394. 395. 396. 397. 398. 399. 400. 401. 402. 403. 404. 405. 406. 407. 408. 409. 410. 411. 412. 413. 414. 415. 416. 417. 418. 419. 420. 421. 422. 423. 424. 425. 426. 427. 428. 429. 430. 431. 432. 433. 434. 435. 436. 437. 438. 439. 440. 441. 442. 443. 444. 445. 446. 447. 448. 449. 450. 451. 452. 453. 454. 455. 456. 457. 458. 459. 460. 461. 462. 463. 464. 465. 466. 467. 468. 469. 470. 471. 472. 473. 474. 475. 476. 477. 478. 479. 480. 481. 482. 483. 484. 485. 486. 487. 488. 489. 490. 491. 492. 493. 494. 495. 496. 497. 498. 499. 500. 501. 502. 503. 504. 505. 506. 507. 508. 509. 510. 511. 512. 513. 514. 515. 516. 517. 518. 519. 520. 521. 522. 523. 524. 525. 526. 527. 528. 529. 530. 531. 532. 533. 534. 535. 536. 537. 538. 539. 540. 541. 542. 543. 544. 545. 546. 547. 548. 549. 550. 551. 552. 553. 554. 555. 556. 557. 558. 559. 560. 561. 562. 563. 564. 565. 566. 567. 568. 569. 570. 571. 572. 573. 574. 575. 576. 577. 578. 579. 580. 581. 582. 583. 584. 585. 586. 587. 588. 589. 590. 591. 592. 593. 594. 595. 596. 597. 598. 599. 600. 601. 602. 603. 604. 605. 606. 607. 608. 609. 610. 611. 612. 613. 614. 615. 616. 617. 618. 619. 620. 621. 622. 623. 624. 625. 626. 627. 628. 629. 630. 631. 632. 633. 634. 635. 636. 637. 638. 639. 640. 641. 642. 643. 644. 645. 646. 647. 648. 649. 650. 651. 652. 653. 654. 655. 656. 657. 658. 659. 660. 661. 662. 663. 664. 665. 666. 667. 668. 669. 670. 671. 672. 673. 674. 675. 676. 677. 678. 679. 680. 681. 682. 683. 684. 685. 686. 687. 688. 689. 690. 691. 692. 693. 694. 695. 696. 697. 698. 699. 700. 701. 702. 703. 704. 705. 706. 707. 708. 709. 710. 711. 712. 713. 714. 715. 716. 717. 718. 719. 720. 721. 722. 723. 724. 725. 726. 727. 728. 729. 730. 731. 732. 733. 734. 735. 736. 737. 738. 739. 740. 741. 742. 743. 744. 745. 746. 747. 748. 749. 750. 751. 752. 753. 754. 755. 756. 757. 758. 759. 760. 761. 762. 763. 764. 765. 766. 767. 768. 769. 770. 771. 772. 773. 774. 775. 776. 777. 778. 779. 780. 781. 782. 783. 784. 785. 786. 787. 788. 789. 790. 791. 792. 793. 794. 795. 796. 797. 798. 799. 800. 801. 802. 803. 804. 805. 806. 807. 808. 809. 810. 811. 812. 813. 814. 815. 816. 817. 818. 819. 820. 821. 822. 823. 824. 825. 826. 827. 828. 829. 830. 831. 832. 833. 834. 835. 836. 837. 838. 839.

•

14
D

COURS ÉLÉMENTAIRE
DE MÉCANIQUE.

L'auteur et les éditeurs de cet ouvrage déclarent qu'ils se réservent le droit de le traduire ou de le faire traduire.

Bibliothèque Polytechnique.

COURS ÉLÉMENTAIRE
DE
MÉCANIQUE

THÉORIQUE ET APPLIQUÉE,

PAR

M. CH. DELAUNAY,

INGÉNIEUR DES MINES,

**PROFESSEUR DE MÉCANIQUE A L'ÉCOLE POLYTECHNIQUE ET A LA
FACULTÉ DES SCIENCES DE PARIS.**



TROISIÈME ÉDITION.



PARIS,

VICTOR MASSON,
Place de l'École-de-Médecine, 17.

LANGLOIS & LECLERCQ,
Rue des Mathurins-Saint-Jacques, 40.

MDCCLIV.

PROGRAMME

DU COURS DE MÉCANIQUE DES LYCÉES

Classe de rhétorique. — Section des sciences.

LES ÉDITEURS ONT INDIQUÉ, PAR DES NUMÉROS DE RENVOI, LES PAGES
OÙ SONT TRAITÉES LES MATIÈRES DE CE PROGRAMME.

Du temps et de sa mesure. Unités adoptées (6). — Du pendule.
Résultats des observations de Galilée (415).

Du mouvement. — Il est absolu ou relatif (5).

Du mouvement uniforme. Vitesse (7).

Du mouvement varié en général. — Mouvement accéléré, retardé, périodique. — Vitesse (8).

Mouvement uniformément accéléré. — Lois de ce mouvement.

La chute des graves dans le vide offre un exemple du mouvement uniformément accéléré (97) — Machine d'Atwood (95). — Appareil à indications continues (104).

Mouvement uniformément retardé (102).

Mouvement circulaire ou de rotation. — Vitesse angulaire 8.

Composition des mouvements. — Indépendance des mouvements simultanés, constatée par l'observation.

Composition des chemins parcourus et des vitesses (122).

Transformation de mouvement.

Du plan incliné (68). — Rapport des espaces parcourus dans le sens du plan, aux espaces parcourus dans le sens de sa base et de sa hauteur (80).

Des poulies. — Poulie fixe. — Poulie mobile dans le cas où les deux brins de la corde sont parallèles (47). — Poulies moullées (48) — Rapports des chemins parcourus par la main de l'homme et par le fardeau (79).

II PROGRAMME DU COURS DE MÉCANIQUE DES LYCÉES.

Du treuil. — Treuil des carriers. — Treuil des puits (49, 52).
— Rapports des chemins parcourus par les chevilles ou par la manivelle, au chemin parcouru par le fardeau.

Des engrenages. — Description sommaire. — Tracé pratique. — Rapport des nombres de tours des roues et des pignons (56).

Des courroies et cordes sans fin (54).

De la vis et de son écrou. — Rapport des chemins parcourus par l'extrémité du levier et par l'écrou ou la vis, dans le sens de l'axe (83).

Des forces et de leurs effets. — Loi de l'inertie. — Forces. — Effets des forces. — Conditions de l'égalité de deux forces. — Égalité de l'action et de la réaction (40).

Comparaison des forces aux poids, à l'aide de dynamomètres. — Le kilogramme peut être pris pour unité de force (13).

Principe de la proportionnalité des forces aux vitesses. — Deux forces constantes appliquées successivement à un même point matériel, partant du repos ou animé d'une vitesse initiale de même direction que les forces, sont entre elles comme les accélérations qu'elles produisent (109).

Conséquence relative au cas où l'une des forces est le poids même du mobile. — Définition de la masse (111).

Relation entre les forces constantes, les masses et les accélérations (140).

Travail d'une force constante, agissant sur un point matériel qui se meut en ligne droite dans la direction de la force (86).

Cas d'une force constante, appliquée tangentiellement à la circonférence d'une roue.

Unités de travail. — Kilogrammètre (89). — Force de cheval-vapeur (299).

Composition de deux forces appliquées à un même point matériel, déduite de la composition des vitesses.

Les distances d'un point de la résultante à deux composantes sont en raison inverse des intensités de ces composantes. — Conséquence pour la composition des forces parallèles.

Extension des propositions qui précèdent aux cas de plusieurs forces concourantes ou parallèles (16 à 27).

Conditions de l'équilibre d'un point matériel. Ces conditions sont indépendantes de l'état de mouvement ou de repos du point considéré.

Centre des forces parallèles. — Centre de gravité. — Cas où le corps a un plan, un axe de symétrie, un centre de figure. — **Sphère. — Parallélipipède. —** Méthode pratique pour déterminer le centre de gravité des corps solides (28 à 33).

Du mouvement uniforme des machines. — Énoncé du principe de la transmission du travail dans ce cas (90).

Le travail moteur est toujours plus grand que l'effet utile (178). — Impossibilité du mouvement perpétuel et de la multiplication du travail moteur (306).

Rendement d'une machine. — C'est le rapport du travail ou effet utile transmis au travail moteur dépensé. — Il constitue la valeur industrielle de l'appareil. — Il est toujours inférieur à l'unité (179).

Énoncé des lois expérimentales du frottement : 1° à l'instant du départ ; 2° pendant le mouvement (158).

Application des principes et des notions précédentes au plan incliné, au levier, au treuil, à la poulie simple ou mouflée, à la vis. — Usages de ces machines (77).

Écoulement des liquides. — Expérience et règle de Torricelli. — **Contraction des veines (444). —** Formules pratiques pour les cas les plus usuels du jaugeage des cours d'eau (456).

Notions sur les moteurs ou récepteurs hydrauliques. Force ou travail absolu d'un cours d'eau. — Il y a pour tous les récepteurs une vitesse relative au maximum d'effet (537).

Anciennes roues à palettes planes, recevant l'eau en dessous. — Roues à aubes courbes. — Roues à aubes planes emboltées dans des coursiers circulaires. — Roues à augets recevant l'eau à la partie supérieure. — Rendement de ces diverses roues (541).

Des pompes. — Soupapes. — Pistons. — Pompes élévatoires. — Pompes aspirantes et élévatoires. — Pompes aspirantes et foulantes. — Causes de pertes de travail moteur inhérentes aux pompes (499).



PROGRAMME

DU COURS DE MÉCANIQUE DES LYCÉES

Classe de rhétorique. — Section des sciences.

LES ÉDITEURS ONT INDiqué, PAR DES NUMÉROS DE RENVOI, LES PAGES
OU SONT TRAITÉES LES MATIÈRES DE CE PROGRAMME.

Du temps et de sa mesure. Unités adoptées (6). — Du pendule.
Résultats des observations de Galilée (415).

Du mouvement. — Il est absolu ou relatif (5).

Du mouvement uniforme. Vitesse (7).

Du mouvement varié en général. — Mouvement accéléré, retardé, périodique. — Vitesse (8).

Mouvement uniformément accéléré. — Lois de ce mouvement.

La chute des graves dans le vide offre un exemple du mouvement uniformément accéléré (97) — Machine d'Atwood (95). — Appareil à indications continues (104).

Mouvement uniformément retardé (102).

Mouvement circulaire ou de rotation. — Vitesse angulaire (8).

Composition des mouvements. — Indépendance des mouvements simultanés, constatée par l'observation.

Composition des chemins parcourus et des vitesses (122).

Transformation de mouvement.

Du plan incliné (68). — Rapport des espaces parcourus dans le sens du plan, aux espaces parcourus dans le sens de sa base et de sa hauteur (80).

Des poulies. — Poulie fixe. — Poulie mobile dans le cas où les deux brins de la corde sont parallèles (47). — Poulies mouflées (18). — Rapports des chemins parcourus par la main de l'homme et par le fardeau (79).

§ 3. *Porosité.* — Les molécules d'un corps ne se touchent pas : elles sont à une certaine distance les unes des autres, et l'on nomme pores les intervalles, vides de matière, qui existent entre elles. Les corps les plus compacts en apparence ne sont pas dépourvus de pores. Les académiciens de Florence, en 1664, ayant rempli d'eau une sphère d'or creuse, et ayant fortement comprimé cette eau, la virent suinter sur toute la surface du métal : l'eau avait traversé les pores de l'or. La porosité ne peut pas être mise en évidence de cette manière pour tous les corps : ainsi le verre est imperméable aux liquides. Mais les changements de volume, qui accompagnent toujours les changements de température, ne peuvent s'expliquer qu'en admettant que les molécules s'éloignent ou se rapprochent les unes des autres, suivant que la température augmente ou diminue ; il en résulte nécessairement que, dans aucun corps de la nature, les molécules ne sont en contact.

§ 4. *États des corps.* — Tous les corps sont susceptibles de prendre trois états différents : l'état solide, l'état liquide et l'état gazeux. Un des corps les plus répandus dans la nature, l'eau, se montre à nous habituellement à l'état liquide : elle passe à l'état solide, lorsqu'elle se change en glace ; elle passe à l'état gazeux, lorsqu'elle se transforme en vapeur. Un grand nombre d'autres corps ont été obtenus sous ces trois états, et l'analogie a conduit à admettre qu'il en serait de même de tous les corps, si l'on pouvait les soumettre à des moyens suffisamment énergiques. A chaque instant de nouveaux faits viennent confirmer ces idées adoptées par les physiciens ; et, si quelques doutes pouvaient encore subsister, ils seraient complètement levés par les belles expériences de M. Despretz, dans lesquelles il est parvenu à fondre et à volatiliser le charbon, le corps le plus réfractaire que l'on connaisse.

§ 5. *Corps solides.* — Dans les corps solides, les molécules ont des positions déterminées les unes par rapport aux autres ; si l'on cherche à les déranger, à déformer le corps, on éprouve une certaine résistance. Cependant l'effort qu'on exerce déplace réellement les molécules, et produit un changement de forme qui est plus ou moins sensible suivant les cas. Un faible effort, appliqué à un barreau mince d'acier, ou à une lame de verre, les fléchira un peu. Si cet effort cesse, le barreau d'acier et la lame de verre reprendront la forme qu'ils avaient précédemment. Cette propriété qu'ont les corps solides de revenir à leur forme primitive, lorsqu'ils sont soustraits à l'action de l'effort qui les avait déformés, constitue ce qu'on appelle l'élasticité. Si l'effort appliqué au corps est trop grand, ce corps pourra se briser, ou bien il se déformera tellement, qu'il ne

pourra plus reprendre exactement sa forme primitive lorsque l'effort cessera : on dit alors qu'on a dépassé la *limite de l'élasticité*. Tous les corps solides sont élastiques, mais à des degrés très différents. Il en est qui le sont tellement peu, qu'il est difficile de leur appliquer un effort assez faible pour ne pas dépasser la limite dont on vient de parler, et qu'on peut les regarder comme étant complètement dépourvus d'élasticité : tel est, par exemple, le plomb. D'autres, au contraire, sont très élastiques, tels que l'acier, le caoutchouc.

§ 6. **Liquides, ou fluides incompressibles.** — Dans les liquides et les gaz, les molécules sont extrêmement mobiles les unes par rapport aux autres ; le moindre effort les déplace. Cette propriété fait qu'on les confond ensemble sous le nom de *fluides*.

Si l'on comprime un liquide dans un vase fermé, on éprouve une très grande résistance, et l'on a peine à reconnaître une légère diminution dans le volume du liquide. Cette diminution est tellement faible, qu'on a douté pendant longtemps qu'elle existât réellement : aussi a-t-on désigné les liquides sous le nom de *fluides incompressibles*. Nous conserverons cette idée de l'incompressibilité des liquides, quoiqu'elle ait été démontrée inexacte, parce qu'il ne peut pas en résulter d'erreur appréciable dans les applications.

§ 7. **Gaz, ou fluides élastiques.** — Si l'on éprouve une très grande difficulté à diminuer le volume d'un liquide d'une quantité insignifiante, par la compression, il n'en est pas de même d'un gaz. Un faible effort suffit pour comprimer, d'une manière très sensible, un gaz contenu dans une enveloppe fermée. Une vessie pleine d'air, et dont l'ouverture a été hermétiquement fermée, diminue visiblement de volume lorsqu'on la serre entre les deux mains. Si, dans un tube de verre, *fig. 4*, fermé par un bout, on introduit un piston capable de remplir complètement l'ouverture du tube, l'air contenu à l'intérieur ne trouvera pas d'issue pour s'échapper,



Fig. 1.

lorsqu'on enfoncera le piston dans le tube : en exerçant une pression sur la tige du piston, on verra le volume de cet air diminuer de plus en plus, et l'on pourra ainsi le réduire à une faible fraction de ce qu'il était primitivement. Lorsqu'ensuite on abandonnera le piston, l'air le repoussera jusque vers l'extrémité du tube en reprenant son premier volume. L'air est donc éminemment compressible et élastique. Il en est de même de tous les gaz, qui, pour cette raison, ont reçu le nom de *fluides élastiques*.

Lorsque l'air est fortement comprimé, comme dans l'expérience

qu'on vient d'indiquer, sa température s'élève beaucoup, et si l'on a mis un peu d'amadou sur la face intérieure du piston, il est assez échauffé pour prendre feu. C'est pour cela que l'appareil représenté par la fig. 4 se nomme *briquet pneumatique*, ou *briquet à air*.

Un litre d'eau étant réduit en vapeur, par l'ébullition dans un vase ouvert, produit 1696 litres de vapeur, c'est-à-dire que cette vapeur serait capable de remplir un cube dont le côté serait de près de 12 décimètres (un cube de 12 décimètres de côté contient 1728 litres). Si la masse d'eau avait primitivement la forme d'un cube, son côté aurait été d'un décimètre : on peut concevoir que, dans le passage de l'état liquide à l'état gazeux, les molécules de l'eau se soient simplement éloignées les unes des autres, en conservant leurs dispositions relatives ; et puisque le côté du cube doit devenir au moins de près de 12 décimètres, il en résulte que, dans la vapeur d'eau, les molécules sont près de douze fois plus éloignées les unes des autres que dans l'eau. On voit donc que les dimensions de chaque molécule doivent être très petites relativement aux distances qui les séparent. Il en est de même pour tous les corps gazeux.



PREMIÈRE PARTIE.

PRINCIPES GÉNÉRAUX

DE LA MÉCANIQUE.

NOTIONS GÉNÉRALES SUR LE MOUVEMENT.

§ 8. Lorsqu'un corps occupe successivement différentes positions dans l'espace, on dit qu'il est en *mouvement*. Une bille qui roule sur le sol, un cheval qui marche sur une route, un bateau qui descend le courant d'une rivière, sont des corps en mouvement.

Nous ne pouvons reconnaître le changement de position de la bille, du cheval, du bateau, qu'en les comparant à des objets voisins qui nous servent de points de repère : ce seront, par exemple, les aspérités du sol, les sinuosités de la route et de la rivière, ou les arbres plantés sur leurs bords. Notre propre corps nous sert souvent de point de repère, pour reconnaître le mouvement des corps qui sont dans notre voisinage.

Lorsque nous n'avons aucun terme de comparaison pour juger du mouvement d'un corps, nous le croyons immobile. C'est ainsi que, si nous sommes dans le salon d'un bateau à vapeur qui marche sur une rivière, et que des stores abaissés sur les fenêtres nous ôtent la vue des objets extérieurs, tout ce qui nous entoure nous semble immobile : cette idée d'immobilité se fixe tellement dans notre esprit, que si nous remontons sur le pont, la première impression que nous éprouvons, c'est de croire que les bords de la rivière, les arbres, les maisons, sont en mouvement; et ce n'est qu'en faisant un effort sur nous-mêmes que nous pouvons revenir à l'idée de l'immobilité des arbres et des maisons, et du mouvement du bateau avec tout ce qu'il porte.

Si les points de repère à l'aide desquels nous jugeons qu'un corps se déplace sont eux-mêmes en mouvement, le mouvement de ce corps ne sera que relatif. Tel sera, par exemple, le mouvement d'une bille que nous verrons rouler sur le pont d'un bateau en marche. Si nous comparions cette bille aux points fixes qui existent sur les bords de la rivière, nous lui trouverions un mouvement tout différent. Il pourrait même se faire qu'elle fût en repos, si elle avait été lancée de l'avant à l'arrière du bateau, avec une telle vitesse qu'elle restât *toujours en face des mêmes points des rives* : elle serait *alors comme si le bateau glissait sous elle sans l'entraîner*.

Tous les mouvements que nous observons autour de nous ne sont que des mouvements relatifs. En effet, la terre est en mouvement autour du soleil, et décrit, en un an, à peu près une circonférence de cercle dont le rayon est de 450 millions de kilomètres. Elle est encore animée d'autres mouvements ; mais celui-là nous suffit pour dire qu'aucun des points de repère que nous prenons sur sa surface n'est immobile. Cependant, dans l'étude des machines et des divers phénomènes mécaniques qui se passent sur la terre, nous pourrions presque toujours considérer les mouvements dont nous parlerons comme des mouvements absolus. Dans la plupart des cas, les choses se passent de la même manière que si la terre était absolument fixe.

§ 9. Lorsqu'on parle du mouvement d'un corps, on fait souvent abstraction de ses dimensions, pour ne s'occuper que d'un de ses points, dans lequel on imagine que toute sa matière est condensée. De cette manière, en se représentant par la pensée la suite des positions que le corps a occupées, on a l'idée d'une ligne, droite ou courbe, qui a été décrite par ce corps, et qu'on nomme sa *trajectoire*. C'est ainsi que, quand on dit qu'un boulet lancé obliquement décrit une ligne courbe, on ne pense qu'au centre de ce boulet. Il n'y a qu'un instant, nous avons dit que la terre décrit à peu près une circonférence de cercle autour du soleil : nous avons fait abstraction des dimensions de la terre, et nous avons regardé toute sa matière comme concentrée en son centre.

Le mouvement d'un corps est *rectiligne* ou *curviligne*, suivant que la ligne qu'il décrit, ou sa trajectoire, est une ligne droite ou une ligne courbe. Les mouvements curvilignes se distinguent les uns des autres par la nature de la ligne courbe qui est décrite : le mouvement est *circulaire*, lorsque la trajectoire est une circonférence de cercle ; *parabolique*, lorsque la trajectoire est une parabole.

§ 10. Le mouvement d'un corps ne serait qu'imparfaitement connu, si l'on se contentait d'observer la forme de la ligne que ce corps décrit : il faut encore examiner le mouvement sous le rapport du temps que le corps met à parcourir les diverses portions de cette ligne.

Les instruments qui servent à mesurer le temps sont connus de tout le monde : ce sont les horloges et les montres. Mais la véritable mesure du temps réside dans les phénomènes astronomiques. Ces phénomènes déterminent des intervalles de temps successifs, égaux entre eux, qu'on appelle des jours. Les horloges et les montres n'ont pas d'autre objet que de diviser le jour en un grand nombre de parties égales, et d'indiquer à un moment quelconque, à

illes se mouvant sur un cadran, le nombre de ces par-
ont écoulées depuis le commencement de la journée. Le
se en 24 heures ; chaque heure se subdivise en 60 mi-
haque minute en 60 secondes. En sorte que l'heure se
3600 secondes, et le jour de 86400 secondes.

naitre complètement le mouvement d'un corps , on de-
r, par exemple, le chemin qu'il parcourt sur sa trajec-
nt une seconde ; puis celui qu'il parcourt pendant une
conde ; ensuite pendant une troisième seconde ; et ainsi
ndant toute la durée du mouvement.

Mouvement uniforme, vitesse. — Si les chemins par-
lant des intervalles de temps égaux successifs sont égaux
et qu'il en soit ainsi, quels que soient ces intervalles de
minutes, des secondes, des quarts de seconde, etc., le
sera *uniforme*. Il est essentiel de faire attention à la
ie les chemins parcourus pendant des intervalles de temps
essifs soient égaux entre eux, *quels que soient ces inter-*
mps : si, par exemple, on trouvait que les chemins par-
dant des secondes successives sont égaux entre eux ,
endant la première demi-seconde le chemin parcouru
and que pendant la deuxième demi-seconde, le mouve-
rait pas uniforme. Ainsi l'aiguille des secondes d'une
ourt des divisions égales dans les secondes successives :
avoir parcouru très rapidement une des divisions , elle
instant, puis elle parcourt la division suivante, s'arrête
, et ainsi de suite : son mouvement n'est pas uniforme.
arant divers mouvements uniformes, on reconnaît qu'ils
uns des autres par le degré plus ou moins grand de ra-
si un convoi de wagons sur un chemin de fer a un mou-
s rapide qu'un bateau à vapeur qui descend une rivière ;
de son côté, un mouvement plus rapide qu'une voiture
un cheval qui va au pas. Le degré plus ou moins grand
d'un mouvement uniforme se mesure par le chemin par-
ant l'unité de temps : c'est ce qu'on nomme la *vitesse*
ement. On dit, par exemple, que le convoi de wagons
1 mètres par seconde ou 36 kilomètres par heure : cha-
mbres 10 et 36 représente la vitesse du convoi. Une
se peut être représentée par des nombres différents, sui-
adoptera telle ou telle unité de temps , telle ou telle
igueur. Aussi, quand on indique le nombre qui repré-
vitesse , doit-on toujours faire connaître les unités de
longueur auxquelles il se rapporte. On ne dira pas une

vitesse 40, ou une vitesse de 40 mètres ; mais on dira une vitesse de 40 mètres par seconde.

§ 42. **Mouvement varié.** — Si les chemins parcourus par le corps, pendant des intervalles de temps successifs égaux entre eux, ne sont pas égaux, le mouvement est dit *varié*. Le mouvement d'un corps qui tombe est un mouvement varié ; il en est de même du mouvement d'un convoi de wagons, à l'approche de l'endroit où il doit s'arrêter.

Dans un mouvement varié, la rapidité du mouvement change d'un moment à l'autre. Si l'on conçoit qu'à un moment donné elle s'entretienne sans changer davantage, le mouvement deviendra uniforme ; la vitesse de ce mouvement uniforme sera ce qu'on appelle la vitesse du mouvement varié au moment considéré. Lorsqu'on est dans un convoi de wagons qui approche du point d'arrivée, on sent très bien que le mouvement se ralentit progressivement : on dit alors que la vitesse diminue ; et si elle était primitivement de 40 mètres par seconde, on conçoit qu'elle deviendra successivement de 9 mètres, de 8 mètres,..... de 4 mètre par seconde, pour finir par être tout à fait nulle, lorsque le convoi sera complètement arrêté. Si, à un moment donné, on dit que la vitesse est de 4 mètres par seconde, cela ne voudra pas dire que, pendant une seconde, le convoi parcourt une longueur de 4 mètres ; mais cela signifiera que, si la rapidité du mouvement se conservait telle qu'elle est au moment considéré, le convoi parcourrait 4 mètres en une seconde.

§ 43. **Mouvement de rotation, vitesse angulaire.** — Un grand nombre de pièces qui font partie des machines ne peuvent que tourner autour d'un axe fixe. Telles sont les meules de rémouleur, les roues à chevilles disposées aux orifices des puits de carrières pour en extraire les pierres, les poulies, les roues dentées qui servent à transmettre le mouvement dans un grand nombre de machines, etc. Un pareil mouvement se nomme *mouvement de rotation*. Tous les points du corps qui tourne décrivent des circonférences de cercle situées dans des plans parallèles entre eux et perpendiculaires à l'axe de rotation ; les arcs de cercle décrits dans le même temps par différents points du corps sont d'autant plus grands que ces points sont plus éloignés de l'axe de rotation.

Si l'on imagine une perpendiculaire abaissée d'un point du corps qui tourne sur son axe de rotation, cette perpendiculaire fera successivement, pendant le mouvement, différents angles avec sa position primitive ; ce sont les angles dont le corps a tourné depuis le commencement de son mouvement. Lorsque les angles ainsi décrits par le corps, pendant des intervalles de temps successifs égaux

ont égaux, quels que soient ces intervalles de temps, on mouvement de rotation est uniforme. Dans ce cas, les points du corps ont des mouvements circulaires et uniformes, leurs vitesses sont respectivement proportionnelles à ces à l'axe. On nomme *vitesse angulaire* l'angle dont le pendant l'unité de temps. Ainsi on dit que la terre, mouvement de rotation autour de la ligne des pôles, a une 15 degrés par heure : cela signifie qu'une ligne qu'on menée à l'intérieur de la terre, perpendiculairement à son un angle de 15 degrés en une heure.

vements de rotation qu'on peut observer dans les mat ordinairement très rapides, on exprime la vitesse angulaire le nombre de tours effectués dans l'unité de temps : on exemple, une vitesse de 300 tours par minute, ou de seconde.

un corps, en tournant autour d'un axe, ne décrit pas des arcs dans des intervalles de temps successifs égaux entre mouvement de rotation est varié. On appelle vitesse angulaire mouvement varié, à un instant quelconque, la vitesse angulaire mouvement de rotation uniforme que prendrait le corps, de cet instant, son mouvement cessait de s'accélérer ou de ralentir.

NOTIONS GÉNÉRALES SUR LES FORCES.

Principe de la matière. — *Un corps qui est en repos ne peut mettre de lui-même en mouvement.*

Un corps qui est en mouvement ne peut pas modifier de lui-même son mouvement.

Le premier de ces deux principes est très clair, et sera admis sans difficulté par tout le monde. On voit bien, il est vrai, les animaux passer d'eux-mêmes de l'état de repos à l'état de mouvement : mais cette propriété qu'ils possèdent n'appartient pas à la matière dont ils sont formés ; elle dépend de cette partie immatérielle de leur être qui leur donne la vie. Dès que la vie cesse, les animaux retrouvent dans les mêmes conditions que les pierres, et il n'est plus capable de passer de lui-même de l'état de repos à l'état de mouvement.

Le second principe a besoin d'être expliqué pour être complètement compris, et aussi pour être complètement admis.

Un corps, réduit par la pensée à un point, se trouve dans un certain mouvement, et qu'aucune cause extérieure ou intérieure ne tend à modifier son mouvement, il résulte de notre

principe que ce corps décrit nécessairement une ligne droite, et que les portions de cette ligne qu'il parcourt dans des temps égaux sont égales, c'est-à-dire que son mouvement est uniforme. En effet, lorsque le corps s'est déplacé pendant un instant, suivant une petite ligne, qu'on peut toujours regarder comme droite, il n'y a pas de raison pour que dans l'instant suivant il dévie de la direction de cette ligne, dans un sens plutôt que dans un autre. Lorsqu'on lance une bille sur un sol bien uni, elle se meut en ligne droite; pour qu'elle dévie de cette ligne, il faut qu'elle rencontre un obstacle qui s'oppose à ce qu'elle continue à se mouvoir comme précédemment. On admettra peut-être plus difficilement que la vitesse du corps ne change pas : car, dans l'exemple qui vient d'être cité, d'une bille roulant sur le sol, on voit toujours le mouvement se ralentir peu à peu, et cesser complètement au bout de quelque temps. Mais on doit observer, que plus le sol est uni, plus la bille va loin, quoiqu'on la lance toujours de la même manière. Ce n'est pas la bille qui diminue d'elle-même sa vitesse; mais ce sont les aspérités du sol, jointes à la résistance que la bille éprouve de la part de l'air, qui, en s'opposant au mouvement, le détruisent peu à peu et finissent par le faire disparaître tout à fait.

Il résulte encore du principe dont nous nous occupons, que si un corps tourne autour d'un axe fixe, sans qu'aucune cause vienne agir sur lui pour altérer son mouvement, il devra continuer à tourner indéfiniment avec la même vitesse angulaire. C'est ainsi qu'une meule de rémouleur, une fois mise en mouvement, et supposée soustraite à toute action extérieure, telle que le frottement de son axe sur son support, la résistance de l'air, la résistance produite par le corps qu'on aiguise sur sa surface, devra conserver indéfiniment un mouvement uniforme de rotation.

Ces deux principes, en vertu desquels un corps ne peut pas, de lui-même, passer de l'état de repos à l'état de mouvement. ni passer d'un état de mouvement à un autre, constituent ce qu'on appelle l'*inertie* de la matière.

§ 45. *Forces.* — Pour qu'un corps se mette en mouvement, ou bien pour qu'il prenne un mouvement différent de celui qu'il avait, il faut une cause : cette cause, quelle qu'elle soit, on la nomme *force*. *Une force est donc une cause quelconque de mouvement ou de modification de mouvement.*

Les forces dont nous aurons à nous occuper sont de diverses espèces :

1° Lorsqu'on abandonne un corps qu'on tenait dans la main, *il tombe sur la terre*. La force qui produit ce mouvement est la

les corps sont soumis à son action. C'est elle qui provoque le mouvement de l'eau dans les fleuves et les rivières.

Si l'on déforme un corps solide, une lame d'acier par exemple, au-delà de la limite de l'élasticité, le corps abandonné à lui-même reprend sa forme primitive, les molécules du corps se meuvent, en vertu de certaines forces intérieures qui tendent à les ramener dans les positions respectives qu'elles avaient avant d'être déplacées, soit en les rapprochant, soit en les éloignant. Lorsqu'on comprime un gaz, et qu'on lui donne ensuite la liberté de se dilater, on voit en effet, ses molécules s'éloignent les unes des autres sous l'action de ces forces intérieures. Ces forces intérieures sont ce que nous appelons les *forces moléculaires*, dont les unes sont attractives et les autres répulsives. Ce sont les forces moléculaires qui forment la puissance des machines à vapeur.

Dans les phénomènes électriques et magnétiques, on observe également des attractions et des répulsions. Un bâton de cire à cacheter, frotté avec du verre, attire des barbes de plume ; un aimant attire un fer. Les forces qui produisent ces mouvements sont des *forces électriques* et *magnétiques*. Nous aurons à nous en occuper plus tard dans l'étude des machines électro-motrices.

La quatrième espèce de force consiste dans celles qui agissent sur les corps par l'homme et les animaux, que l'on confond sous le nom de *forces animales*.

Pressions, tensions. — Une force qui est appliquée à un corps ne détermine pas toujours le mouvement de ce corps. Une pierre posée sur une table y reste immobile ; et cependant cette pierre est soumise à l'action de la pesanteur : car si l'on imaginait que la table disparaît instantanément, elle tomberait aussitôt. Une pierre suspendue à l'extrémité inférieure d'une corde dont l'extrémité supérieure est attachée à un point fixe, reste également immobile ; et si l'on venait à couper la corde, elle tomberait immédiatement. Une force qui ne produit pas le mouvement du corps sur lequel elle est appliquée, elle donne lieu à une *pression* ou à une *tension*. Une pierre posée sur une table exerce une pression sur la table ; une pierre suspendue à une corde détermine une tension dans la corde. Un homme qui cherche à soulever un fardeau trop lourd exerce une pression sur ce fardeau, dans les points où il le touche de ses mains.

— Lorsqu'un corps, soumis à la seule action de la pesanteur, est maintenu dans l'immobilité par un obstacle, la pression qui en résulte est ce qu'on appelle le *poids* du corps. Il faut bien se garder de confondre les mots *pesanteur* et

poids : le mot pesanteur désigne la cause générale qui fait tomber les corps à la surface de la terre ; le mot poids indique un effet résultant de l'action de cette cause générale sur un corps en particulier.

Le poids d'un corps peut être rendu sensible à l'aide de l'instrument représenté par la *fig. 2*. Cet instrument est formé

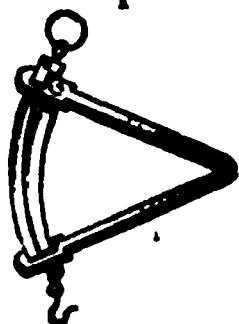


Fig. 2.

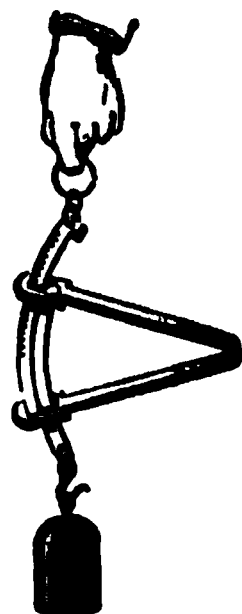


Fig. 3.

d'une lame d'acier, qui est recourbée en son milieu, et qui présente un certain degré de flexibilité ; à l'extrémité de la branche inférieure est fixé un arc de fer, qui passe librement dans une ouverture pratiquée dans la branche supérieure, et se termine par un anneau ; vers l'extrémité de la branche supérieure est fixé un autre arc de fer, qui passe dans une ouverture pratiquée dans la branche inférieure, et se termine par un crochet. Si l'on saisit cet instrument par l'anneau, et qu'on suspende un corps au crochet, le poids de ce corps fera fléchir le ressort, les extrémités se rapprocheront, et l'instrument prendra la forme représentée par la *fig. 3*.

En suspendant ainsi successivement différents corps au crochet, on verra que les extrémités du ressort se rapprocheront plus ou moins. Lorsqu'elles se rapprocheront de la même quantité, sous l'action des poids de différents corps, on dira que les poids de ces corps

sont égaux entre eux. Si l'on suspend ensemble au crochet deux de ces corps de même poids, le ressort fléchira plus que lorsqu'on n'en suspendait qu'un seul. Tout corps qui, suspendu au crochet, produira la même flexion que ces deux corps réunis, sera dit avoir un poids double du poids de chacun d'eux. On dira de même que le poids d'un corps est triple, quadruple, etc., du poids d'un des premiers corps, lorsqu'il produira sur le ressort la même flexion que trois, quatre, etc., de ces premiers corps réunis ensemble.

Le gramme étant le poids d'un centimètre cube d'eau pure, prise à la température de son maximum de densité, il sera facile, à l'aide de l'instrument représenté par la *fig. 2*, de trouver combien de grammes pèse un corps. Pour plus de commodité, on marquera sur l'arc extérieur, qui aboutit à l'anneau, les points où devra s'arrêter l'extrémité du ressort, lorsqu'on suspendra au crochet des poids de 4 gramme, 2 grammes, 3 grammes, etc.

Il est bien clair qu'un seul ressort ne pourra pas servir pour peser les corps légers et les corps très lourds : le poids qu'on suspendra au crochet ne devra jamais être capable de dépasser la limite de l'élasticité du ressort, sans quoi l'instrument se détériorerait. On prendra

donc des ressorts très flexibles pour les corps légers, et des ressorts de moins en moins flexibles, à mesure qu'ils seront destinés à peser des corps plus lourds. Mais le principe de la mesure du poids d'un corps à l'aide de ces différents ressorts restera le même.

Lorsque le poids d'un corps se compose d'un grand nombre de grammes, on l'évalue ordinairement en kilogrammes (le kilogramme vaut 1000 grammes); c'est le kilogramme que nous prendrons le plus habituellement pour unité de poids. On emploie quelquefois une unité plus grande, la tonne, qui vaut 1000 kilogrammes.

§ 48. *Mesure des forces, dynamomètres.* — Quelle que soit la force qui détermine une pression ou une tension, cette pression ou cette tension pourra être assimilée au poids d'un corps, et évaluée en kilogrammes. Si un cheval tire une corde attachée à un corps qu'il cherche à mettre en mouvement, on peut concevoir que la corde soit coupée en un point, et que les deux bouts ainsi séparés soient attachés, *fig. 4*, l'un à l'anneau, l'autre au crochet de l'instrument décrit précédemment; la force de traction sera ainsi exercée par l'intermédiaire de cet instrument, le ressort fléchira et la tension de la corde sera équivalente au poids du corps qui, étant suspendu au ressort, le fléchirait de la même quantité. Cette tension pourra donc être représentée par un certain nombre de kilogrammes.

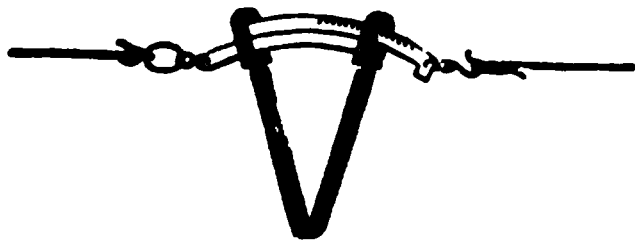


Fig. 4.

On prend pour mesure d'une force, la grandeur de la pression ou la tension qu'elle produit, lorsqu'elle agit sur un corps qui ne peut se déplacer. Ainsi la force qui fait tomber un corps est mesurée par le poids de ce corps; ainsi, dans l'exemple qu'on vient de prendre, la force développée par le cheval est mesurée par la tension de la corde. Une force quelconque pourra donc toujours être représentée par un certain nombre de kilogrammes.

Pour trouver le nombre de kilogrammes qui représente une force, il suffira de la faire agir sur un ressort pareil à celui de la *fig. 2*. Mais on pourra aussi employer pour cela des ressorts de formes différentes, tels que ceux qui sont représentés par les *fig. 5* et *6*. Le premier, *fig. 5*, est un ressort contourné en hélice, ou ce que l'on nomme un ressort à boudin, qui est enformé dans un cylindre. Une tige, qui le traverse dans toute sa longueur, suivant l'axe du cylindre, se termine inférieurement par une tête sur laquelle s'appuie l'une des



Fig. 5.

extrémités du ressort; l'autre bout de cette tige est muni d'un anneau qui sert à suspendre l'instrument. Le cylindre, qui appuie sur l'extrémité supérieure du ressort, porte un crochet auquel on applique la force qu'il s'agit de mesurer. La tige sort plus ou moins du cylindre, suivant qu'il est soumis à une force de traction plus ou moins grande: on la gradue d'avance, en suspendant à son crochet des corps dont les poids sont connus.

La *fig. 6* représente deux lames de ressorts, dont les extrémités

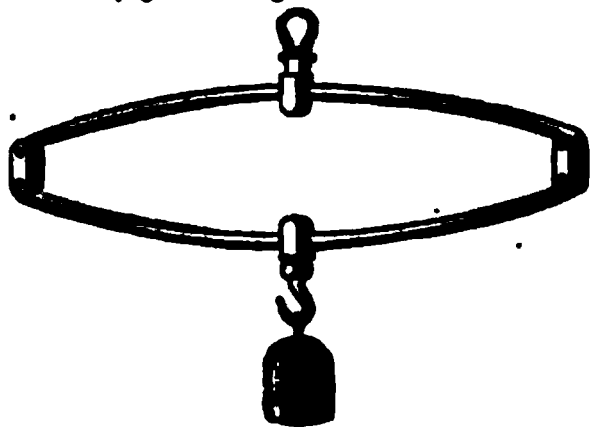


Fig. 6.

sont réunies dans deux espèces de chapes à l'aide de boulons; un anneau est attaché à l'une des lames, et un crochet à l'autre lame. Les milieux de ces deux lames s'écartent plus ou moins l'un de l'autre, suivant que la force de traction exercée sur le crochet est plus ou moins grande.

Tous ces instruments, *fig. 2, 5 et 6*, portent le nom de *dynamomètres* (de *δυναμις*, force, et *μετρον*, mesure). Le dernier, *fig. 6*, imaginé par M. Poncelet, jouit d'une propriété précieuse pour les recherches expérimentales sur la grandeur des forces développées dans diverses circonstances: c'est que l'augmentation de la distance des points milieux des lames est proportionnelle à la grandeur de la force appliquée au dynamomètre. Si une force de 4 kilogramme a augmenté la distance de ces points d'un millimètre, une force de 2 kilogrammes l'augmentera de 2 millimètres, une force de 3 kilogrammes l'augmentera de 3 millimètres, et ainsi de suite, mais seulement jusqu'à une certaine limite que la grandeur de la force ne devra pas dépasser.

§ 49. **Direction d'une force.** — On appelle *direction d'une force*, la direction du mouvement que cette force communiquerait à un corps, dans le cas où ce corps, primitivement en repos, pourrait céder librement à l'action de la force, sans qu'aucun obstacle le gênât dans son mouvement. Un corps qu'on tient dans la main, et qu'on abandonne ensuite à lui-même, tombe en parcourant une ligne droite verticale; cette verticale est la direction de la force qui le fait tomber.

Pour représenter d'une manière sensible les diverses forces qui agissent sur un corps, ou sur un ensemble de corps, on trace, par le point d'application de chacune d'elles, une ligne droite qui indique sa direction, et l'on porte sur ces diverses lignes droites, à partir des *points d'application des forces*, et dans le sens de leur action, des

longueurs proportionnelles à ces forces. Si l'on convient, par exemple, de représenter une force de 4 kilogramme par une longueur de 4 centimètre, la *fig. 7* indique que le corps *M* est soumis à des forces *P*, *Q*, *R*, égales respectivement à 2^k , 3^k , 4^k , appliquées aux points *A*, *B*, *C*, et dirigées suivant les lignes droites qui partent de ces trois points. Souvent, pour fixer plus clairement le sens dans lequel agit une force, on termine par une flèche la ligne qui la représente, ainsi que le montre la *fig. 7*.

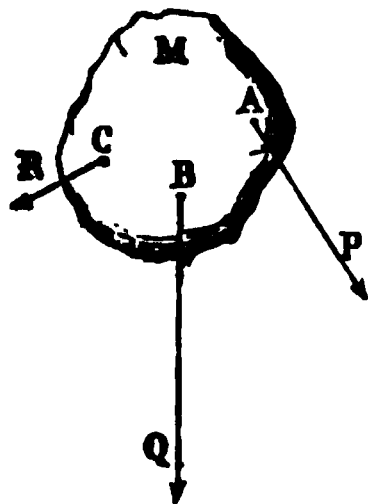


Fig. 7.

COMPOSITION DES FORCES.

§ 20. *Résultante, composantes.*—Lorsque plusieurs forces agissent sur un même corps solide, il arrive souvent qu'on peut trouver une autre force qui, agissant seule sur le corps, soit capable de produire exactement le même effet.

Plusieurs chevaux étant attelés à une voiture, on conçoit qu'on puisse les remplacer par un moteur unique, une locomotive, par exemple, qui tire la voiture et donne lieu au même mouvement ; la force de traction de la locomotive produira le même effet que les forces développées simultanément par les chevaux.

La force unique, dont l'action peut ainsi être substituée à l'action simultanée de plusieurs autres forces, sans que l'effet soit changé, se nomme la *résultante* de ces forces ; celles-ci à leur tour, par opposition, prennent le nom de *composantes*. La composition des forces a pour objet de déterminer la résultante, lorsque l'on connaît les composantes.

§ 21. *Équilibre.*—Avant d'exposer les règles de la composition des forces, il est nécessaire de définir le mot *équilibre*, dont nous aurons souvent à nous servir. Il peut arriver que plusieurs forces, agissant sur un corps, ou sur un ensemble de corps, se neutralisent mutuellement, en sorte que les choses se passent de la même manière que si les forces n'agissaient pas : on dit alors que ces forces *se font équilibre*, ou bien que le corps ou l'ensemble de corps auquel ces forces sont appliquées *est en équilibre*.

On doit bien distinguer le mot *repos* du mot *équilibre*. Le premier indique l'état d'un corps qui ne se déplace pas ; il n'y entre aucune idée de forces. Le second désigne l'état d'un corps qui, étant soumis à l'action de plusieurs forces, se trouve dans les mêmes conditions que si ces forces n'agissaient pas. Un corps peut être animé

d'un mouvement, sans être soumis à l'action d'aucune force (§ 44); si l'on vient à lui appliquer des forces qui se font équilibre, son mouvement n'en sera nullement troublé, puisque ces forces se détruisent mutuellement : l'équilibre des forces appliquées à un corps n'entraîne donc pas l'idée de l'immobilité du corps. Ainsi les mots repos et équilibre ont des significations essentiellement différentes.

§ 22. *Équilibre stable, équilibre instable.* — L'acception qu'on donne vulgairement au mot équilibre n'est pas la même que celle que nous lui attribuons ici. On dit qu'on a mis un corps en équilibre, lorsqu'on est parvenu à lui donner une position dans laquelle il reste immobile, mais dont il s'éloigne immédiatement sous l'action de la plus petite cause extérieure. Si l'on a pu, par exemple, placer un cône sur une table, en l'appuyant seulement par son sommet, *fig. 8*, sans qu'il tombe d'un côté ni d'un autre, on dit qu'on a mis



Fig. 8.



Fig. 9.

ce cône en équilibre. Pour nous, le cône est aussi bien en équilibre lorsqu'il repose sur la table par sa base, *fig. 9*, que par son sommet. Dans l'un et l'autre cas, la force qui tend à faire tomber le cône, qui le ferait tomber si la table ne le soutenait pas, est mise en équilibre par la pression que la table exerce de bas en haut sur la partie inférieure du cône. Ce qui distingue ces deux cas, c'est que dans l'un, *fig. 8*, pour peu qu'on dérange le cône, il ne reprendra pas la position qu'il avait : l'équilibre est *instable*.

Tandis que dans l'autre, *fig. 9*, si l'on dérange un peu le cône, en tirant son sommet d'un côté quelconque, il reprendra immédiatement sa position primitive : l'équilibre est *stable*. Ainsi ce qu'on appelle vulgairement équilibre, pour nous c'est l'équilibre instable.

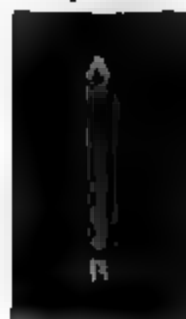


Fig. 10.

§ 23. *Forces agissant suivant une même direction.* — Si un corps est soumis à l'action de trois forces, une de 3^h , une de 5^h , et une de 6^h , appliquées au point A, *fig. 40*, suivant une même direction AB, et dans le même sens, ce corps est dans les mêmes conditions que si, la ligne AB étant verticale, trois poids de 3^h , de 5^h et de 6^h , étaient suspendus au point A.

Or il résulte de ce qui a été dit précédemment (§ 47) qu'un poids unique de 44^h (44 est la somme des nombres 3 , 5 et 6) produira le même effet sur le point A : on peut donc dire que des forces, en nombre quelconque, appliquées à un même point, dans

une même direction, et dans un même sens, ont une résultante égale à leur somme, et agissant dans la direction et dans le sens des composantes.

Si un corps est soumis à l'action de deux forces égales, appliquées à un même point, suivant la même direction, mais en sens contraires, il est clair que ces deux forces se font équilibre.

Considérons un corps soumis à l'action de trois forces, une de 3^a , une autre de 5^a , et une troisième de 6^a , agissant sur le point A, fig. 11, dans le sens AB, et à deux forces, de 4^a et de 7^a , dans le sens contraire AC. On pourra remplacer les trois premières forces par une force de 44^a agissant dans le sens AB, et les deux dernières par une force de 11^a agissant dans le sens AC. Mais la force de 44^a peut être regardée comme provenant de la composition d'une force de 41^a , et d'une autre de 3^a , agissant toutes deux suivant AB : la première de ces deux composantes est détruite par la force égale, qui agit en sens contraire, et il ne reste plus que la force de 3^a , agissant dans le sens AB, qui tient complètement lieu des cinq forces données. Il résulte de là que, pour composer plusieurs forces agissant sur un point, suivant une même direction, mais dans des sens différents, il faut faire la somme des forces qui tirent dans un sens, et la somme des forces qui tirent en sens contraire; puis retrancher la plus petite de ces deux sommes de la plus grande : la différence représentera la résultante de toutes les forces données, résultante qui agira dans le sens de la plus grande des deux sommes qu'on aura obtenues.

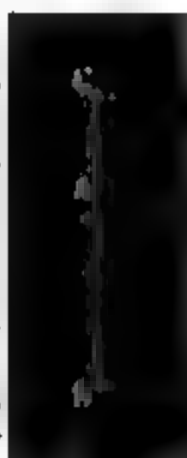


Fig. 11.

Si plusieurs forces, agissant sur un corps suivant une même ligne droite, étaient appliquées en différents points de cette ligne droite, on devrait les traiter comme si elles étaient toutes appliquées à un même point : car il est clair que l'action d'une force reste la même, lorsqu'on l'applique successivement en différents points de sa direction.

§ 24. *Forces parallèles.*—Pour démontrer la composition des forces agissant suivant des directions parallèles, nous nous servirons de l'appareil suivant. Une barre prismatique de bois AB, fig. 42, est suspendue en son milieu, à l'aide d'un couteau d'acier qui la traverse et fait saillie des deux côtés. L'arête de ce couteau, tournée vers le bas, s'appuie sur deux plans d'acier fixés dans une chape qui est adaptée au support CD : en sorte que la barre peut tourner librement autour de cette arête. La face anté-

rière de cette barre porte 40 divisions d'égale longueur, de chaque

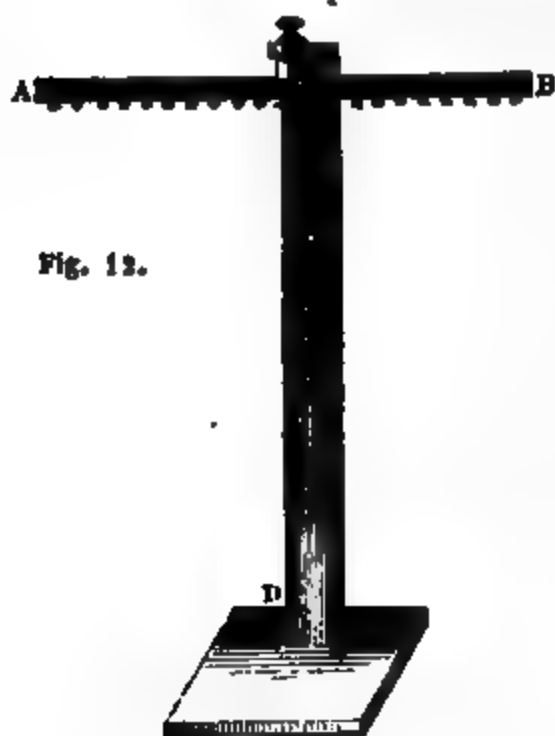


Fig. 12.

côté du point de suspension : et, au-dessous des points de division, sont disposés de petits anneaux, auxquels on peut accrocher des poids, tellement construits qu'on puisse d'ailleurs les suspendre les uns au-dessus des autres.

Si l'on accroche d'abord deux poids égaux, de chacun 400 grammes par exemple, en deux points également éloignés du milieu de la barre, *fig. 13*, on voit qu'elle demeure horizontale. Si l'on enlève ces deux poids, et qu'on les accroche l'un au-dessous de l'autre, au milieu même de la barre, *fig. 14*, elle demeure

encore horizontale; et l'on admettra aisément que, dans l'un et l'autre cas, le couteau presse de la même manière les petits plans d'acier qui le supportent. Si l'on



Fig. 13.



Fig. 14.

conservait quelque doute sur ce dernier fait, il suffirait de suspendre la chape qui porte les plans d'acier à un ressort dynamométrique, et l'on verrait ce ressort fléchir de la même quantité dans les deux cas. La *fig. 13* représente la barre soumise à l'action de deux forces égales et

parallèles : on conclut de ce qui précède, que ces deux forces peuvent être remplacées par une force unique, double de chacune d'elles, et appliquée au milieu de la ligne droite qui joint leurs points d'application.

Imaginons maintenant qu'on suspende à la barre *AB*, *fig. 12*, 44 poids de chacun 1 hectogramme, également espacés le long de cette barre, et dont celui du milieu correspondra au point de suspension de la barre, ainsi que le montre la *fig. 15*. La barre, ainsi régulièrement chargée, se maintiendra dans une position horizontale. Mais, d'après ce qu'on vient de voir, on peut prendre deux de ces

oids, placés à égale distance du milieu, et les suspendre au milieu, sans que l'effet produit sur la barre cesse d'être le même : elle restera toujours horizontale, et pressera toujours également la chape qui la supporte. En transportant ainsi successivement deux à deux, au milieu de la barre, les poids qui étaient répartis uniformément dans sa longueur, on finira par obtenir la disposition que représente la *fig. 16* ; et l'on en conclura que la barre *AB*, chargée de 11 poids égaux, de chacun 1 hectogramme, régulièrement répartis sur toute sa longueur, se trouve dans les mêmes conditions que lorsqu'elle est chargée d'un poids unique de 11 hectogrammes suspendu à son milieu.

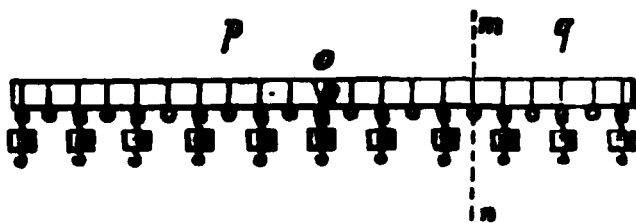


Fig. 15.

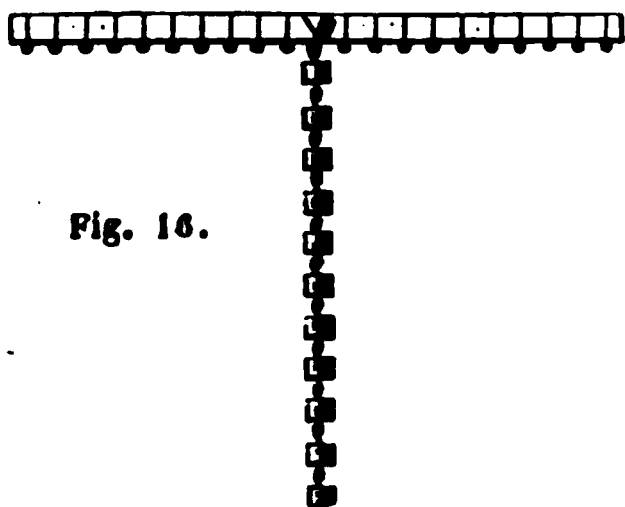


Fig. 16.

Reprenons la barre régulièrement chargée de la *fig. 15*, et divisons les 11 poids qu'elle porte en deux groupes, par la ligne *mn*, qui en laisse 8 à gauche et 3 à droite. Les 8 poids de gauche peuvent être réunis, d'après ce qu'on vient de voir, au point *p*, milieu de la longueur sur laquelle ils sont régulièrement répartis ; les 3 poids de droite pourront également être réunis au point *q*, par la même raison : et la barre présentera la disposition de la *fig. 17*, sans cesser d'être dans les mêmes conditions. Donc deux poids, l'un de 8 hectogrammes, et l'autre de 3 hectogrammes, accrochés, le premier en *p*, le second en *q*, produisent le même effet qu'un poids unique de 11 hectogrammes accroché en *o*. Si l'on observe de plus que *op* contient 3 divisions de la barre, et que *oq* en contient 8, on pourra en conclure la proposition suivante : Deux forces parallèles, appliquées à un corps solide, ont une résultante égale à leur somme, parallèle à chacune d'elles, et dont le point d'application divise la distance des points d'application des composantes en deux parties qui sont inversement proportionnelles aux grandeurs de ces composantes.

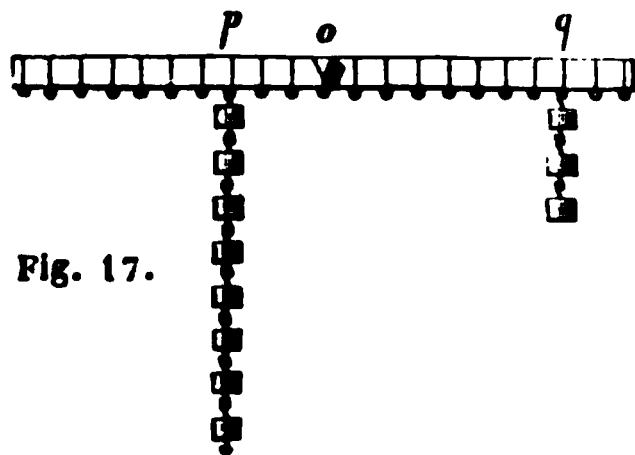


Fig. 17.

§ 25. Soit un corps *M*, *fig. 18*, soumis à l'action de quatre forces

parallèles, dont l'une de 3^k est appliquée au point A ; une autre de 5^k est appliquée au point B ; une troisième de 4^k est appliquée au point C, et enfin une quatrième de 4^k est appliquée au point D. Les deux forces appliquées aux points A et B peuvent être remplacées par une force de 8^k , appliquée au point O, qui est tel qu'on a

$$\frac{OA}{OB} = \frac{5}{3},$$

Cette force de 8^k peut être composée avec la force appliquée au point C, et il en résultera une force de 12^k , appliquée au point O'. Enfin cette nouvelle résultante partielle se composera avec la force appliquée au point D, et l'on obtiendra définitivement une force de 13^k ,

appliquée au point O'', et qui sera la résultante de toutes les forces données. On voit par là comment on pourra toujours composer en une seule, des forces parallèles et de même sens, quel que soit leur nombre; la résultante qu'on obtiendra sera toujours égale à la somme des composantes.

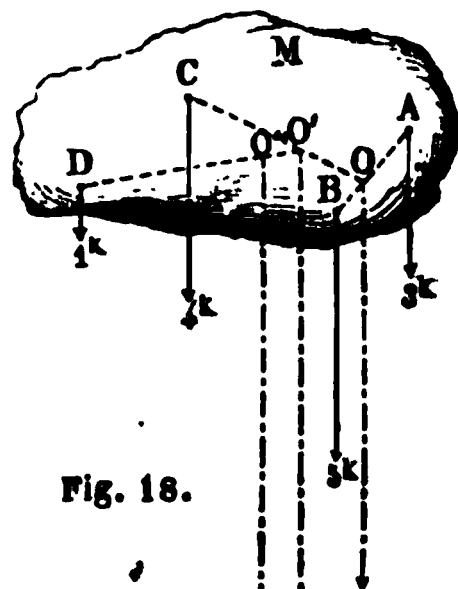


Fig. 18.

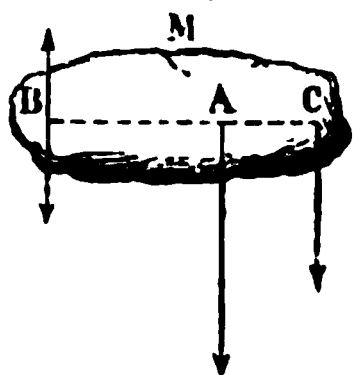


Fig. 19.

§ 26. Si un corps M, fig. 19, est soumis à l'action de deux forces parallèles et de sens contraires, l'une de 4^k appliquée en A, et l'autre de 4^k appliquée en B, on trouvera leur résultante de la manière suivante. On regardera la plus grande des deux forces, celle de 4^k , comme provenant de la composition d'une force de 4^k appliquée en B, et d'une force de 7^k appliquée en un point C qu'on déterminera aisément : pour cela on prolongera BA, et l'on prendra la distance AC telle qu'on ait

$$\frac{AC}{AB} = \frac{4}{7}.$$

La force de 4^k étant remplacée par ses deux composantes, on aura au point B deux forces de 4^k chacune, et de sens contraires, qui se détruiront ; et il ne restera plus qu'une force de 7^k , appliquée au point C,

qui sera la résultante des deux forces données.

Si les deux forces parallèles et de sens contraires étaient égales, on ne pourrait pas trouver une force unique qui pût complètement les remplacer ; ces deux forces n'auraient pas de résultante.

§ 27. Lorsqu'un corps sera soumis à l'action d'autant de forces

parallèles qu'on voudra, agissant les unes dans un sens, les autres en sens contraire, on cherchera la résultante des premières, puis celle des dernières, et l'on obtiendra ainsi deux résultantes partielles, agissant en sens contraires et dans des directions parallèles. Il n'y aura plus ensuite qu'à composer entre elles ces deux résultantes partielles, conformément à ce qui a été dit dans le § 26. Cette dernière composition pourra toujours s'effectuer, à moins que les deux résultantes partielles ne soient égales, et n'agissent pas suivant la même ligne droite : dans ce cas exceptionnel, les forces données n'auront pas de résultante.

§ 28. *Des leviers.* — Avant d'aller plus loin, nous appliquerons ce qui précède à la recherche du principe du levier, principe qui nous servira ensuite pour trouver la résultante de deux forces appliquées à un même point, suivant des directions différentes.

Le levier est une barre AB, fig. 20, à l'aide de laquelle on sou-
lève un corps pe-
sant M, qui porte
sur l'extrémité A,
en exerçant un ef-
fort à l'autre extré-
mité B. Cette barre
est appuyée en C,
sur l'arête d'un sup-
port, autour de la-
quelle elle peut tour-
ner, lorsque l'effort

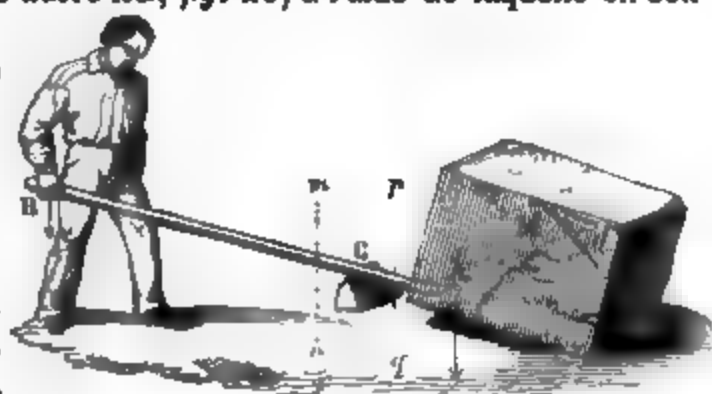


Fig. 20.

appliqué en B est suffisamment grand. Supposons que le corps M, déjà soulevé d'une petite quantité, soit maintenu immobile, à l'aide du levier, dans la position qui lui a été donnée : le levier se trouvera soumis à l'action de deux forces, dont l'une est la pression que le corps M exerce en A, et l'autre est l'effort appliqué en B pour empêcher le corps M de retomber. Ces deux forces, que nous regarderons comme parallèles, peuvent, d'après ce qui précède, être remplacées par une force unique, produisant le même effet sur le levier. Cette force unique doit passer par le point C : car, s'il en était autrement, si elle était dirigée à gauche ou à droite de ce point, suivant *mn*, ou suivant *pq*, le levier tournerait nécessairement autour du point C, à gauche ou à droite, sous l'action de cette force qui lui serait seule appliquée. L'immobilité du levier, sous l'action simultanée des deux forces qui lui sont appliquées en A et en B, exige donc que la résultante de ces deux forces passe par le point C. Mais on sait que, pour cela, il faut que les forces soient inversement pro-

portionnelles aux distances AC et BC, qu'on nomme les bras de levier. Si CB est 40 fois, 400 fois, 4000 fois plus grand que l'effort qu'on devra exercer en B sera 40 fois, 400 fois, 4000 fois plus petit que la pression supportée en A par le levier, et à l'inverse, si l'effort en B est 40 fois, 400 fois, 4000 fois plus petit que la pression en A, il s'agira de faire équilibre. De là le principe suivant : *Deux forces agissant sur un levier, se font équilibre, lorsqu'elles sont en raison inverse des bras de levier, aux extrémités desquelles elles sont appliquées.*

Ce principe a été découvert par Archimède, qui en a fait toute l'importance par ce mot bien connu : « Qu'on me donne un levier et un point d'appui, et je soulèverai le monde. »

§ 29. Le levier, sur lequel a été fait le raisonnement précédent, était supposé droit, et soumis à l'action de deux forces parallèles l'une à l'autre. Examinons maintenant un levier coudé ACB

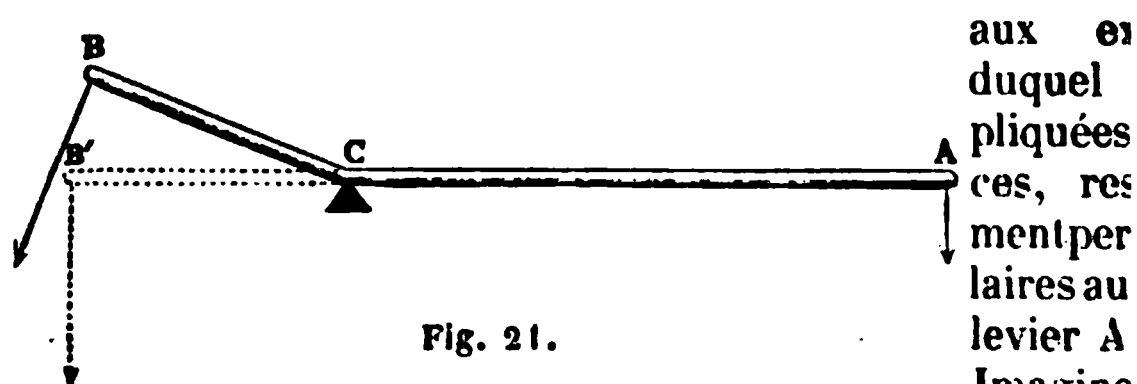


Fig. 21.

Imaginons que le bras de levier BC soit supprimé, et qu'on le remplace par un bras de levier B'C, de même longueur, mais dirigé suivant la perpendiculaire B'C au bras de levier AC : le levier coudé ACB se trouve remplacé par un levier droit ACB'. On admettra sans peine que la force appliquée en B', perpendiculairement à B'C, la force qui était appliquée en B, elle agira de la même manière, pour faire tourner le levier autour du point d'appui C ; et que, dans l'un et l'autre cas, la force appliquée en A devra avoir la même grandeur, pour faire équilibre à la force appliquée au point A. Mais nous avons trouvé que, pour l'équilibre d'un levier droit soumis à l'action de deux forces parallèles, que les forces fussent inversement proportionnelles aux bras de levier aux extrémités desquelles elles agissent : il en sera donc de même pour le levier coudé, soumis à l'action de forces dirigées perpendiculairement aux bras de ce levier.

Il arrivera souvent que les forces appliquées à un levier, coudé, ne seront pas dirigées perpendiculairement à leurs bras de levier. Dans ce cas, si l'on imagine, fig. 22, des perpendiculaires CA', CB', abaissées du point d'appui C sur les directions des forces, on pourra regarder les forces comme étant dans les conditions que si elles étaient appliquées aux extrémités

à CB' ; et l'on en conclura que, pour qu'il y ait équilibre, il faut que les forces soient inversement proportionnelles aux longueurs des perpendiculaires CA' et CB' . On voit donc que, pour le principe du levier, il faut qu'on considère les bras du levier, aux extrémités desquels les forces sont appliquées, les perpendiculaires abaissées du point d'appui sur les directions des forces.

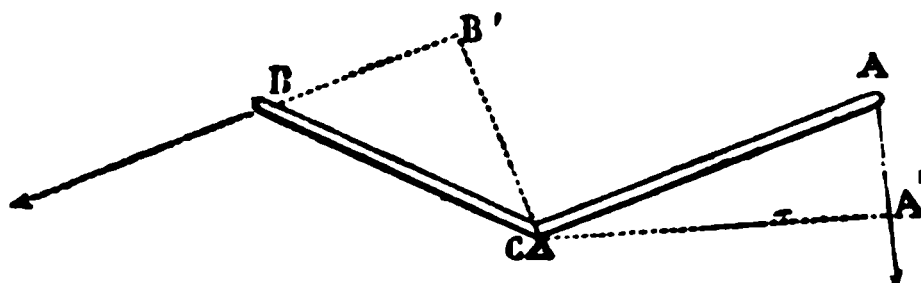


Fig. 22.

Lorsqu'un levier ABC, fig. 23, aura son point d'appui à l'une de ses extrémités C, soumis à deux forces agissant en A et B, dans des directions parallèles, et en sens contraires, on peut considérer CA et CB comme deux bras de levier.

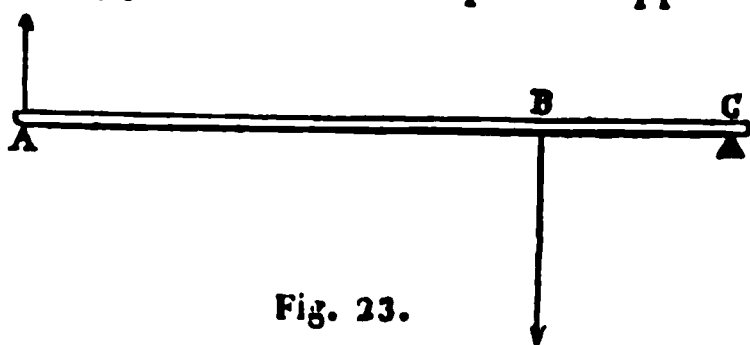
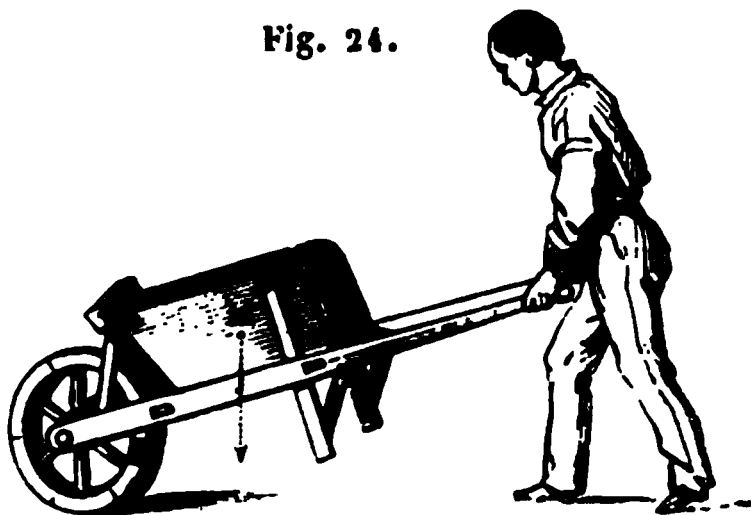


Fig. 23.

On peut donner la brouette, fig. 24, comme exemple de ce genre de levier. Le point d'appui est la roue ; l'une des forces appliquées est le poids du corps placé dans la brouette ; et l'autre force résultante des deux forces exercées de bas en haut par les mains de la personne qui tient les manivelles de cette brouette.

Fig. 24.



Dans tout ce que nous venons de dire, relativement au levier, nous l'avons toujours regardé comme étant un corps solide de forme invariable. Il n'en est pas réellement ainsi : un effort, quelque petit qu'il soit, déforme toujours un peu le corps auquel il est appliqué. Lorsqu'un levier est soumis à l'action de certaines forces, il se déforme par flexion, puis il conserve la nouvelle forme qu'il a prise, tant que les forces agissent sur lui ; il se trouve alors dans les

mêmes conditions que s'il n'avait jamais eu d'autre forme que celle que les forces lui ont données, et l'on peut lui appliquer, en toute rigueur, ce qui a été dit précédemment pour un levier de forme invariable. Il est clair que, quand on voudra se servir d'un levier, on doit toujours le prendre assez solide pour que la déformation qu'il éprouvera, sous l'action des forces, ne dépasse pas la limite de son élasticité.

§ 32. *Forces appliquées à un point dans diverses directions.* — Il est aisé de reconnaître que deux forces, appliquées à un même point, dans deux directions différentes, ont une résultante. Imaginons pour cela qu'une corde ACB, fig. 25, ait été attachée, par ses deux extrémités, en deux points fixes A et B; et qu'au point C on ait suspendu un poids de 40^k , à l'aide d'une autre corde CD. Le poids se placera de manière que la corde CD soit verticale; les deux por-



Fig. 25.

tions AB, et CB de la première corde seront tendues, et leurs tensions seront des forces appliquées au point C, suivant CA et CB, qui maintiendront en équilibre le poids de 40^k . Mais ce poids serait également tenu en équilibre par une force unique de 40^k , agissant sur le point C, verticalement et de bas en haut, suivant CD: cette dernière force produirait donc, à elle seule, le même effet que les forces dirigées suivant CA

et CB, agissant ensemble, et par suite elle est leur résultante.

§ 33. Soit M, fig. 26, un corps soumis à l'action de deux forces,

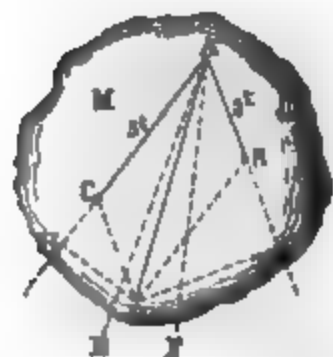


Fig. 26.

l'une de 3^k , l'autre de 5^k , représentées en grandeur et en direction par les lignes droites AB, AC. Pour trouver la résultante de ces deux forces, on construira le parallélogramme ABCD; la diagonale AD représentera cette résultante, en grandeur et en direction. Nous diviserons en deux parties la démonstration de cette proposition, et nous commencerons par prouver que la résultante des deux forces données est dirigée suivant la diagonale AD.

Nous avons un moyen bien simple de reconnaître si la résultante des forces AB et AC est dirigée suivant AD: c'est de supposer que le point D du corps soit fixe, et que le corps ne puisse que tourner autour de ce point. Si la résultante passe, en effet, par le point D, la fixité de ce point détruit complètement son action, et le corps re-

tera en équilibre ; il sera donc aussi en équilibre, lorsqu'au lieu de la résultante, ce seront les composantes AB et AC qui agiront sur lui. Si, au contraire, la résultante des forces données passait à gauche ou à droite du point D, si elle était dirigée suivant AE ou AF, on ne mettrait pas le corps en équilibre, en fixant le point D, puisque cette résultante tendrait à le faire tourner à gauche ou à droite, et que rien ne s'opposerait à ce qu'il tournât réellement : le corps ne serait donc pas en équilibre sous l'action des forces AB et AC, qui doivent produire le même effet que leur résultante. Or si nous abaissons du point D, qui est supposé fixe, des perpendiculaires DG, DH sur les directions des deux forces, nous pourrions regarder ces forces comme étant dans les mêmes conditions que si elles agissaient sur un levier coudé, dont les bras seraient DG et DH. D'ailleurs les deux triangles DBG, DCH sont semblables, puisqu'ils sont rectangles, et que les angles en B et en C sont égaux ; ils fourniront donc la proportion

$$\frac{CD}{BD} = \frac{DH}{DG},$$

ou bien, en observant que CD est égal à AB, et que BD est égal à AC, comme côtés opposés d'un parallélogramme,

$$\frac{AB}{AC} = \frac{DH}{DG}.$$

Donc les forces AB et AC sont inversement proportionnelles à leurs bras de levier DG et DH, et par suite ces deux forces se font équilibre. On doit en conclure, d'après ce qu'on vient de dire, que la résultante de ces deux forces passe par le point D, c'est-à-dire qu'elle est dirigée suivant la diagonale AD.

Pour la démonstration précédente, la fig. 26 a été faite de manière que le point D fasse partie du corps M, auquel les forces AB et AC sont appliquées : mais il est clair que la direction de la résultante de ces forces ne dépend, en aucune manière, de la forme ni des dimensions du corps sur lequel elles agissent, et que, dans tous les cas, cette direction sera celle de la diagonale du parallélogramme formé sur les deux lignes droites qui représentent les composantes en grandeur et en direction.

§ 34. Passons à la seconde partie de la proposition énoncée au commencement du § 33, qui consiste en ce que la résultante des deux forces AB et AC est représentée en grandeur par la diagonale AD. Nous observerons d'abord que, quand on connaît les directions de deux forces appliquées à un point, la direction de leur résultante, et la grandeur de l'une des composantes, on peut, par ce qui précède, trouver la grandeur de l'autre composante. Soit ACB, fig. 27, une corde dont une extrémité est fixée au point A, et dont on tire

l'autre extrémité B, au point C de cette corde est suspendu un poids, et la force de traction exercée au point B, pour maintenir ce poids en équilibre, est mesurée par un dynamomètre. On sait que les tensions des cordons CA et CB ont une résultante dirigée suivant

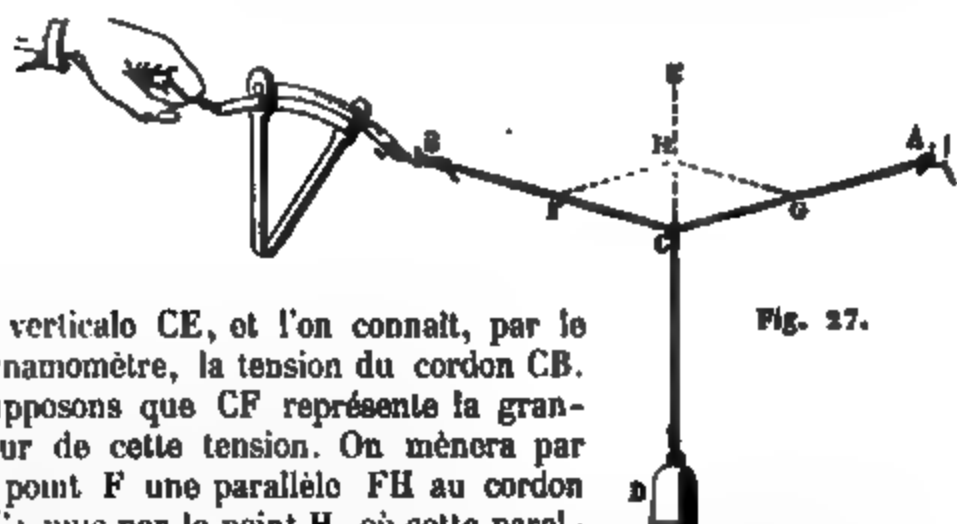


Fig. 27.

la verticale CE, et l'on connaît, par le dynamomètre, la tension du cordon CB. Supposons que CF représente la grandeur de cette tension. On mènera par le point F une parallèle FH au cordon AC; puis par le point H, où cette parallèle coupe la direction CE de la résultante, on mènera une parallèle HG au cordon CB: la longueur CG représentera la grandeur de la tension du cordon AC. On voit, en effet, que si cette tension était représentée par une longueur plus grande ou plus petite que CG, la résultante ne serait pas dirigée suivant la diagonale du parallélogramme construit sur les lignes qui représentent les composantes.



Fig. 28.

Lorsqu'un corps M, *Fig. 28*, est soumis à l'action de deux forces AB, AC, ces deux forces ont une résultante, qui est dirigée suivant la diagonale AD du parallélogramme ABDC, ainsi que nous l'avons démontré. Si nous appliquons au corps, suivant AF, une force égale et directement opposée à la résultante, elle fera équilibre à cette résultante, et sera par conséquent capable de faire aussi équilibre à ses composantes: ainsi le corps M, soumis à l'action des forces AB, AC, et d'une force agissant suivant AF, et égale à la résultante que nous cherchons, se trouvera en équilibre. La force AC, faisant équilibre aux deux autres, mettrait également en équilibre leur résultante: donc la résultante de la force AB, et de la force appliquée suivant AF, est dirigée suivant la ligne AE, prolongement de AC. Ainsi nous connaissons les directions AB, AF de deux forces, la direction AE

Donnera la grandeur de la force cherchée suivant celle
à la grandeur de la résultante que nous cherchons,
force AF lui est égal et contraire. Mais ABEF
est un parallélogramme, AF est égal à BE, de plus, à cause du
triangle ADBE, le côté BE est égal au côté AD : donc
AF, et l'on peut en conclure que AD représente en
résultante des deux forces AB et AC.

de ce que nous venons de démontrer, nous sommes
en mesure d'énoncer la proposition suivante : *La résultante de deux
forces agissant à un point, suivant des directions différentes, est re-
présentée en grandeur et en direction par la diagonale du parallélo-
gramme construit sur les lignes droites qui représentent les compo-
santes.* Cette proposition est habituellement désignée sous le nom
de *loi du parallélogramme des forces*.

Il arrive souvent qu'une force étant donnée, on a besoin de
la décomposer en deux autres forces agissant suivant des directions
et dont elle serait la résultante. c'est ce que l'on ap-
pelle décomposer la force donnée en deux composantes, dont les di-
rections sont données. Cette décomposition se fera facilement, à l'aide
de la loi du parallélogramme des forces. Soit
la ligne qui représente
la force donnée, appliquée au point
A, agissant dans la direction
AC et AD. Par le point



mêmes conditions que s'il n'avait jamais eu d'autre forme que celle que les forces lui ont données, et l'on peut lui appliquer, en toute rigueur, ce qui a été dit précédemment pour un levier de forme invariable. Il est clair que, quand on voudra se servir d'un levier, on devra toujours le prendre assez solide pour que la déformation qu'il éprouvera, sous l'action des forces, ne dépasse pas la limite de son élasticité.

§ 32. *Forces appliquées à un point dans diverses directions.* — Il est aisé de reconnaître que deux forces, appliquées à un même point, dans deux directions différentes, ont une résultante. Imaginons pour cela qu'une corde ACB, fig. 25, ait été attachée, par ses deux extrémités, en deux points fixes A et B; et qu'au point C on ait suspendu un poids de 40^k , à l'aide d'une autre corde CD. Le poids se placera de manière que la corde CD soit verticale; les deux portions AB, et CB de la première corde

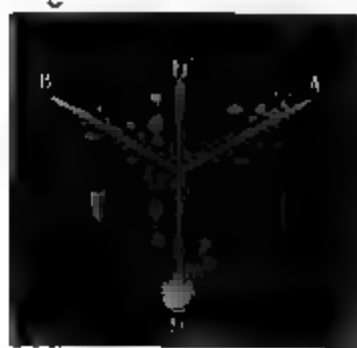


Fig. 25.

seront tendues, et leurs tensions seront des forces appliquées au point C, suivant CA et CB, qui maintiendront en équilibre le poids de 40^k . Mais ce poids serait également tenu en équilibre par une force unique de 40^k , agissant sur le point C, verticalement et de bas en haut, suivant CD' : cette dernière force produirait donc, à elle seule, le même effet que les forces dirigées suivant CA

et CB, agissant ensemble, et par suite elle est leur résultante.

§ 33. Soit M, fig. 26, un corps soumis à l'action de deux forces, l'une de 3^k , l'autre de 5^k , représentées en grandeur et en direction par les lignes droites AB, AC. Pour trouver la résultante de ces deux forces, on construira le parallélogramme ABCD; la diagonale AD représentera cette résultante, en grandeur et en direction. Nous diviserons en deux parties la démonstration de cette proposition, et nous commencerons par prouver que la résultante des deux forces données est dirigée suivant la diagonale AD.

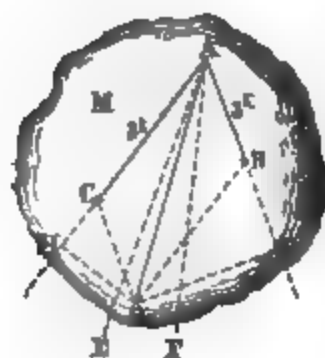


Fig. 26.

Nous avons un moyen bien simple de reconnaître si la résultante des forces AB et AC est dirigée suivant AD : c'est de supposer que le point D du corps soit fixe, et que le corps ne puisse que tourner autour de ce point. Si la résultante passe, en effet, par le point D, la fixité de ce point détruira complètement son action, et le corps res-

sera en équilibre ; il sera donc aussi en équilibre, lorsqu'au lieu de la résultante, ce seront les composantes AB et AC qui agiront sur lui. Si, au contraire, la résultante des forces données passait à gauche ou à droite du point D, si elle était dirigée suivant AE ou AF, on ne mettrait pas le corps en équilibre, en fixant le point D, puisque cette résultante tendrait à le faire tourner à gauche ou à droite, et que rien ne s'opposerait à ce qu'il tournât réellement : le corps ne serait donc pas en équilibre sous l'action des forces AB et AC, qui doivent produire le même effet que leur résultante. Or si nous abaissons du point D, qui est supposé fixe, des perpendiculaires DG, DH sur les directions des deux forces, nous pourrions regarder ces forces comme étant dans les mêmes conditions que si elles agissaient sur un levier coudé, dont les bras seraient DG et DH. D'ailleurs les deux triangles DBG, DCH sont semblables, puisqu'ils sont rectangles, et que les angles en B et en C sont égaux ; ils fourniront donc la proportion

$$\frac{CD}{BD} = \frac{DH}{DG},$$

ou bien, en observant que CD est égal à AB, et que BD est égal à AC, comme côtés opposés d'un parallélogramme,

$$\frac{AB}{AC} = \frac{DH}{DG}.$$

Donc les forces AB et AC sont inversement proportionnelles à leurs bras de levier DG et DH, et par suite ces deux forces se font équilibre. On doit en conclure, d'après ce qu'on vient de dire, que la résultante de ces deux forces passe par le point D, c'est-à-dire qu'elle est dirigée suivant la diagonale AD.

Pour la démonstration précédente, la fig. 26 a été faite de manière que le point D fasse partie du corps M, auquel les forces AB et AC sont appliquées : mais il est clair que la direction de la résultante de ces forces ne dépend, en aucune manière, de la forme ni des dimensions du corps sur lequel elles agissent, et que, dans tous les cas, cette direction sera celle de la diagonale du parallélogramme formé sur les deux lignes droites qui représentent les composantes en grandeur et en direction.

§ 34. Passons à la seconde partie de la proposition énoncée au commencement du § 33, qui consiste en ce que la résultante des deux forces AB et AC est représentée en grandeur par la diagonale AD. Nous observerons d'abord que, quand on connaît les directions de deux forces appliquées à un point, la direction de leur résultante, et la grandeur de l'une des composantes, on peut, par ce qui précède, trouver la grandeur de l'autre composante. Soit ACB, fig. 27, une corde dont une extrémité est fixée au point A, et dont on tire

l'autre extrémité B; au point C de cette corde est suspendu un poids P et la force de traction exercée au point B, pour maintenir ce point en équilibre, est mesurée par un dynamomètre. On sait que les tensions des cordons CA et CB ont une résultante dirigée sui-

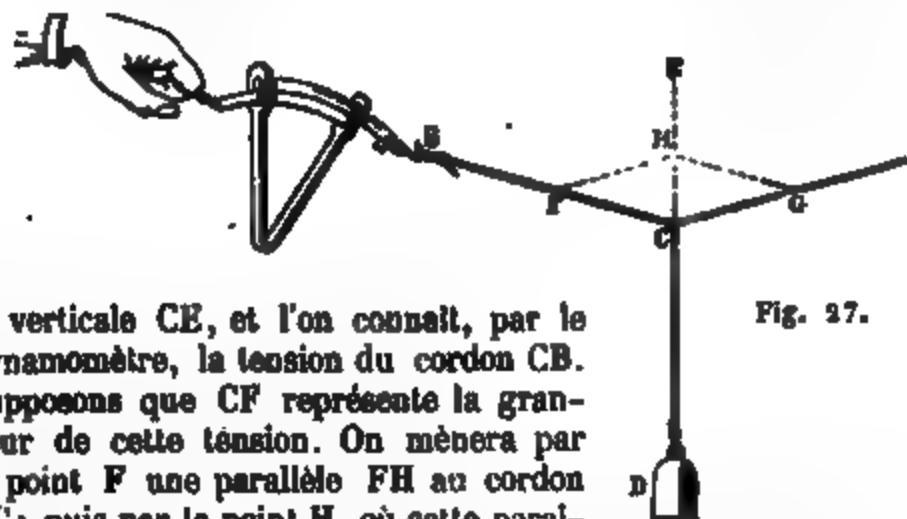


Fig. 27.

la verticale CE, et l'on connaît, par le dynamomètre, la tension du cordon CB. Supposons que CF représente la grandeur de cette tension. On mènera par le point F une parallèle FH au cordon AC; puis par le point H, où cette parallèle coupe la direction CE de la résultante, on mènera une parallèle HG au cordon CB: la longueur CG représentera la grandeur de la tension du cordon AC. On voit, en effet, que si cette tension était représentée par une longueur plus grande ou plus petite que CG, la résultante ne serait pas dirigée suivant la direction du parallélogramme construit sur les lignes qui représentent les composantes.



Fig. 28.

Lorsqu'un corps M, *fig. 28*, est soumis à l'action de deux forces AB, AC, ces deux forces ont une résultante, qui est dirigée suivant la diagonale AD du parallélogramme ABDC, ainsi que nous l'avons montré. Si nous appliquons au corps, suivant une force égale et directement opposée à la résultante, elle fera équilibre à cette résultante, et par conséquent capable de faire aussi équilibre à ses composantes: ainsi le corps M, soumis à l'action des forces AB, AC, et d'une force agissant suivant AF, et égale à la résultante que nous cherchons, trouvera en équilibre. La force AC, faisant équilibre aux deux autres, mettrait également en équilibre leur résultante: donc la résultante de la force AB et de la force appliquée suivant AF, est dirigée suivant la ligne AE, prolongement de AC. Ainsi, connaissant les directions AB, AF de deux forces, la direction

de leur résultante, et la grandeur AB de l'une d'elles; nous pouvons, comme nous l'avons fait voir il n'y a qu'un instant, déterminer la grandeur de la composante dirigée suivant AF . Pour cela, par le point B , nous mènerons BE parallèle à AF , puis, par le point E , nous mènerons EF parallèle à AB . La longueur AF , ainsi obtenue, représentera la grandeur de la force dirigée suivant cette ligne, et aussi la grandeur de la résultante que nous cherchons, puisque cette force AF lui est égale et contraire. Mais $ABEF$ étant un parallélogramme, AF est égal à BE ; de plus, à cause du parallélogramme $ADBE$, le côté BE est égal au côté AD : donc AD est égal à AF , et l'on peut en conclure que AD représente en grandeur la résultante des deux forces AB et AC .

Au moyen de ce que nous venons de démontrer, nous sommes en mesure d'énoncer la proposition suivante : *La résultante de deux forces appliquées à un point, suivant des directions différentes, est représentée en grandeur et en direction par la diagonale du parallélogramme construit sur les lignes droites qui représentent les composantes.* Cette proposition est habituellement désignée sous le nom de *parallélogramme des forces*.

§ 35. Il arrive souvent qu'une force étant donnée, on a besoin de la remplacer par deux autres forces agissant suivant des directions déterminées, et dont elle serait la résultante; c'est ce que l'on appelle décomposer la force donnée en deux composantes, dont les directions sont connues. Cette décomposition se fera facilement, à l'aide du parallélogramme des forces. Soit AB , *fig. 29*, la ligne qui représente la force donnée, appliquée au point A , et qu'il s'agit de décomposer en deux autres forces agissant dans les directions AC et AD . Par le point B on mènera BE parallèle à AD , et BF parallèle à AC , et l'on obtiendra ainsi les lignes AE , AF , qui représenteront les grandeurs des composantes qu'on voulait trouver.

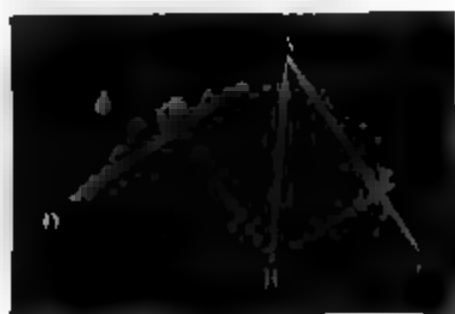


Fig. 29.

§ 36. Lorsqu'un corps sera soumis à l'action de plus de deux forces, appliquées à un même point, suivant des directions différentes, on trouvera la résultante de toutes ces forces de la manière suivante. On composera d'abord deux des forces données en une seule; puis on composera la résultante partielle, ainsi obtenue, avec une troisième des forces données; et l'on continuera ainsi jusqu'à ce que, par des compositions successives, on ait réduit toutes les forces données à une seule, qui sera leur résultante.

DU CENTRE DE GRAVITÉ D'UN CORPS.

§ 37. **Définition du centre de gravité.** — Un corps solide est formé par la réunion d'un grand nombre de molécules placées à côté les unes des autres dans des positions déterminées. Chacune de ces molécules est pesante ; elle est soumise à une force agissant verticalement et de haut en bas, que nous appelons son poids. Les poids des différentes molécules, dont l'ensemble constitue un corps solide, sont donc autant de forces appliquées au corps, aux différents points où sont placées ces molécules. À moins que le corps n'ait de très grandes dimensions, on peut regarder les verticales menées par ses différents points comme parallèles entre elles : toutes les forces dont on vient de parler sont donc parallèles, et ont en conséquence une résultante : c'est cette résultante que nous avons appelée le poids du corps.

Pour trouver la résultante des poids des diverses molécules d'un corps solide, on composera ces poids, conformément à ce qui a été expliqué au § 25, relativement à la composition d'un nombre quelconque de forces parallèles, agissant sur un corps solide, dans un même sens. Imaginons, pour simplifier, que le corps solide, dont nous nous occupons, ne contienne que quatre molécules A, B, C, D, fig. 30, dont nous supposerons les poids tous égaux à un milligramme. Les forces appliquées en A et B se composeront en une seule force,

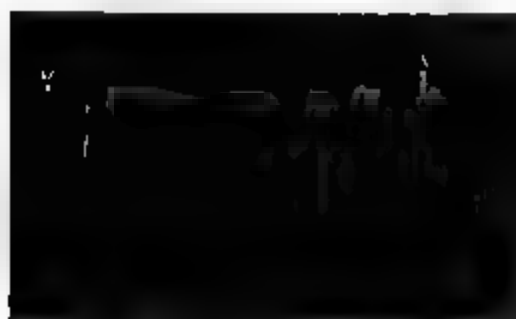


Fig. 30.

de deux milligrammes, appliquée au point E, milieu de la ligne AB. Cette première résultante partielle se composera, à son tour, avec la force appliquée en C, en une force unique, de trois milligrammes, appliquée en un point F ; ce point est situé sur la ligne CE, de telle manière que EF est la moitié de CF, ou, ce qui revient au même, le tiers de CE. Cette deuxième résultante partielle se composera enfin avec la force appliquée en D, ce qui donnera la résultante définitive de quatre milligrammes, appliquée au point G, situé sur la ligne FD, au quart de cette ligne à partir du point F.

Concevons maintenant qu'on retourne le corps composé des molécules A, B, C, D, pour le mettre dans une autre position, sans le déformer, c'est-à-dire sans que les molécules qui le constituent ces-

sent d'être placées de la même manière les unes par rapport aux autres. Le corps ayant été ainsi retourné, nous pourrions répéter la composition des poids des molécules, comme nous venons de l'effectuer dans la première position du corps; et si nous avons soin de composer ces poids dans le même ordre, ainsi que l'indique la fig. 31, il est clair que nous retrouverons successivement, pour les points d'application des résultantes partielles et de la résultante définitive, les mêmes points E, F, G, que nous avons trouvés précédemment.



Fig. 31.

Le résultat que nous venons d'obtenir, s'obtiendra évidemment de même, quel que soit le nombre des molécules d'un corps, et aussi quels que soient les poids de ces molécules, qui pourront être égaux ou inégaux. Ce n'est que pour fixer les idées, que nous avons réduit à quatre le nombre des molécules, et que nous les avons supposées également pesantes. Dans tous les cas, le point d'application de la résultante définitive des poids des diverses molécules ne dépendra aucunement de la position qu'on aura donnée au corps : ce point sera toujours placé de la même manière par rapport aux molécules.

Le point dont nous venons de reconnaître l'existence, par lequel passe constamment la résultante des poids des diverses molécules d'un corps, quelle que soit la position qu'on lui aura donnée, se nomme le *centre de gravité* de ce corps.

§ 38. *Détermination expérimentale du centre de gravité.* — Lorsqu'un corps est suspendu à une corde, par un point de sa surface, fig. 32, il prend une certaine position d'équilibre. La force qui tend à le faire tomber est son poids, et le point d'application de cette force est son centre de gravité. Si le corps ne tombe pas, c'est qu'il éprouve de la part de la corde une traction, dirigée de bas en haut, qui fait équilibre à la première force, et qui doit en conséquence lui être égale et directement opposée. On conclut de là que, si l'on imagine la direction de la corde prolongée à l'intérieur du corps, suivant la ligne AB, cette ligne devra passer par son centre de gravité.

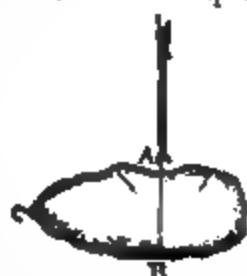


Fig. 32.

Si l'on vient maintenant à suspendre le corps par un autre point

de sa surface, il prendra une nouvelle position d'équilibre, *fig. 33*. Dans cette nouvelle position, la corde étant supposée prolongée à l'intérieur du corps, suivant CD, passera encore par le centre de gravité. Si l'on a conservé la trace de la première ligne AB, qui passait déjà par ce point, on voit qu'il ne pourra se trouver qu'au point de rencontre G de AB avec CD.

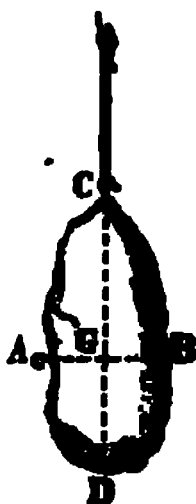


Fig. 33.

Le moyen qui vient d'être indiqué pour trouver le centre de gravité d'un corps peut paraître difficile à employer réellement, parce qu'il suppose qu'on ait tracé à l'intérieur du corps les deux lignes AB et CD. Mais s'il ne peut pas conduire à trouver ainsi exactement la position du centre de gravité, il fournira au moins, dans un grand nombre de cas, des indications suffisantes sur

la place qu'occupe ce point à l'intérieur du corps. Prenons pour exemple une canne de jonc, garnie à son extrémité supérieure d'une pomme d'ivoire. Cette canne est symétrique tout autour d'un axe qui la traverse dans toute sa longueur : il est clair que son centre de gravité est situé sur cet axe. Pour trouver où il est placé au juste, il suffira de suspendre la canne horizontalement, en l'attachant à une corde, ou bien en la posant sur l'arête vive d'un corps fixe, comme le montre la *fig. 34* ; on cherchera, par le tâtonnement, en quel point la



Fig. 34.

canne doit être appuyée, pour se maintenir horizontalement à l'aide de ce seul point d'appui, et

l'on en conclura que son centre de gravité est situé au point de l'axe de figure qui se trouve immédiatement au-dessus du point d'appui.

§ 39. Centre de gravité d'un corps homogène. — Il arrive souvent que la matière dont un corps se compose est répandue uniformément dans toute l'étendue du volume qu'il occupe ; en sorte que, si l'on prend dans diverses parties du corps la quantité de matière contenue dans un millimètre cube, par exemple, on trouvera que le poids de cette matière sera toujours le même, quel que soit le point du corps où on l'aura prise. Dans ce cas, la position du centre de gravité ne dépend absolument que de la configuration du corps, et la recherche de ce point se réduit à une question de géométrie.

En géométrie, on appelle centre de figure d'une surface, un point tel qu'en menant une ligne droite, comme on voudra, par ce point, et la terminant de part et d'autre à la surface, elle se trouve divisée par le point en deux parties égales. Toutes les fois que la surface d'un corps homogène aura un centre de figure, il est bien évident

que ce point sera le centre de gravité du corps. C'est ainsi que le centre de gravité d'un parallélépipède, *fig. 35*, est au point de rencontre de deux des diagonales ; que le centre de gravité d'un cylindre droit, *fig. 36*, ou oblique, *fig. 37*, est au milieu de la ligne droite qui joint les centres des deux bases ; que le centre de gravité d'une sphère est au centre de cette sphère ; que le centre de gravité d'un



Fig. 35.



Fig. 36.



Fig. 37.



Fig. 38.

anneau, *fig. 38*, est au centre de cet anneau. On voit, par ce dernier exemple, que le centre de gravité d'un corps n'est pas nécessairement situé dans la portion de l'espace qui est occupée par la matière du corps.

§ 40. **Centre de gravité d'une surface.**— Quelquefois le corps dont on veut trouver le centre de gravité présente dans toute son étendue une même épaisseur, qui est petite par rapport à ses autres dimensions : en sorte que l'on est naturellement porté à faire abstraction de cette épaisseur, et à assimiler le corps à une simple surface. C'est ce qui arrivera, par exemple, pour une planche mince, ou une feuille de tôle. Si, de plus, ce corps est homogène, la position de son centre de gravité ne dépendra que de la figure de la surface à laquelle on le suppose réduit. C'est ainsi qu'on est conduit à chercher le centre de gravité d'une surface.

On reconnaîtra facilement que le centre de gravité d'un parallélogramme, *fig. 39*, est au point de rencontre de ses diagonales. On verra de même que celui d'un cercle n'est autre chose que le centre du cercle.



Fig. 39.

Pour trouver le centre de gravité d'un triangle, *fig. 40*, nous observerons que la ligne *AD*, qui joint le sommet *A* au milieu de la base *BC*, divise en deux parties égales toutes les lignes, telles que *mn*, menées parallèlement à la base. Imaginons que les molécules dont se compose notre triangle soient rangées régulièrement le long de ces lignes, et que le triangle soit posé sur l'arête vive d'un prisme *PQ*, de manière à s'appuyer sur cette arête par la ligne *AD*. Chaque des files de molécules, si elle était seule, se tiendrait

en équilibre sur l'arête du prisme, puisqu'elle est supportée par son milieu. Toutes les files étant supposées liées ensemble, de manière à former le triangle, se maintiendront encore en équilibre, et le triangle ne tendra pas à tomber plutôt d'un côté que de l'autre ; on en conclut nécessairement que le centre de gravité du triangle est situé sur la ligne AD. On verra de même qu'il est situé sur la ligne qui joint le sommet B au milieu E du côté AC : donc il se trouve au point G de rencontre de ces deux



Fig. 40.

lignes. On démontre en géométrie que le point G, ainsi obtenu, divise la ligne AD en deux parties, dont l'une, AG, est double de l'autre, GD : on peut donc dire que le centre de gravité d'un triangle est sur la ligne qui joint le sommet au milieu de la base, et à un tiers de cette ligne à partir de la base.

À l'aide du résultat que nous venons d'obtenir, nous résoudrons sans peine la question suivante : Trois hommes doivent porter un triangle pesant, fig. 41, en le prenant chacun par un des sommets : quel est celui qui sera le plus chargé, et celui qui le sera le moins ?



Fig. 41.

Le poids du triangle, que nous supposons être de 45^{lb}, est une force appliquée à son centre de gravité G. D'après ce que nous venons de voir, la ligne BG prolongée va passer par le milieu D du côté AC, et la distance BG est le double de la distance GD : nous pouvons donc regarder la force verticale de 45^{lb}, appliquée

au point G, comme résultant de la composition d'une force verticale de 15^{lb} appliquée au point B, et d'une autre force verticale de 30^{lb} appliquée au point D. Mais cette dernière force, qui agit au milieu de AC, peut être considérée comme provenant de la composition de deux forces verticales, de chacune 15^{lb}, agissant l'une en A, l'autre en C. Donc le poids du triangle équivaut à trois forces, de 15^{lb} chacune, agissant verticalement aux trois sommets du triangle ; par suite, les trois hommes qui porteront le triangle seront également chargés, quelle que soit sa forme.

§ 41. Centre de gravité d'un corps formé par la réunion de plusieurs autres corps. — Lorsqu'on connaît les centres de gra-

et les poids des diverses parties dont un corps est formé, il est facile de trouver le centre de gravité du corps tout entier. Prenons pour exemple deux boulets inégaux, homogènes, fixés l'un à l'autre par une tige cylindrique, également homogène, *fig. 42*.

Supposons que le plus gros des deux boulets pèse 5^k , le plus petit 2^k , et la tige qui les réunit 4^k . Le centre de gravité du corps tout entier est le point

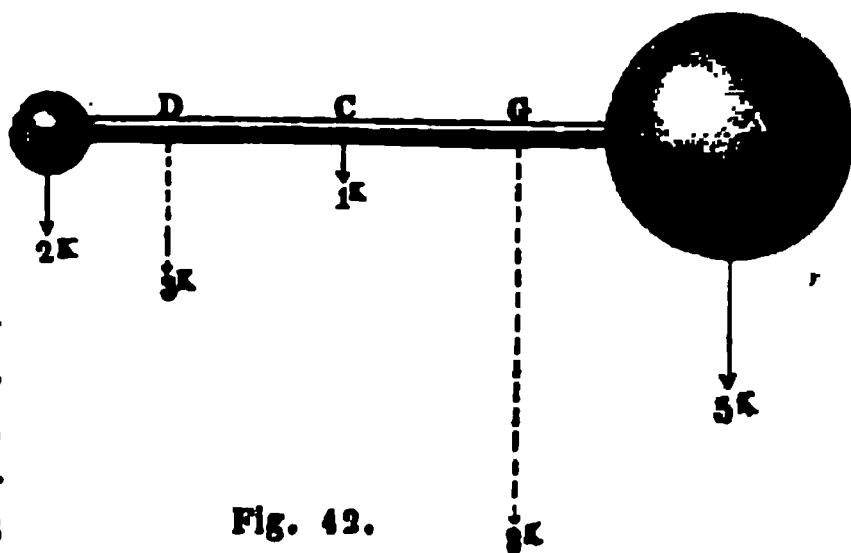


Fig. 42.

d'application de la résultante des poids de ses diverses molécules. On peut d'abord composer entre eux les poids des molécules du gros boulet, ce qui donnera une force de 5^k , appliquée à son centre A ; on composera également entre eux les poids des molécules du petit boulet, et l'on trouvera une force résultante de 2^k , appliquée au point B, centre de ce petit boulet ; enfin la résultante des poids des molécules de la tige, qui réunit les deux boulets, est une force de 4^k , agissant au point C, milieu de l'axe de cette tige. Il ne reste plus qu'à composer ces trois forces parallèles de 5^k , 2^k et 4^k , appliquées respectivement aux points A, B, C, pour avoir la résultante définitive, dont le point d'application est le centre de gravité que nous voulons trouver. Pour cela on composera les forces de 2^k et 4^k , agissant en B et C, en une seule de 3^k , agissant au point D, qui est tel que DB est la moitié de DC ; ensuite on composera la force de 3^k appliquée au point D, avec celle de 5^k appliquée au point A, en une seule force de 8^k , qui agira sur un point G, tel que AG soit les $\frac{3}{5}$ de GD. G sera le centre de gravité du corps tout entier.

§ 42. **Équilibre d'un corps pesant qui repose sur un plan horizontal.** — Lorsqu'un corps pesant s'appuie sur un plan horizontal, sur une table ou sur le sol, par exemple, pour qu'il se maintienne dans cette position sans tomber ni d'un côté ni d'un autre, il doit remplir certaines conditions : la considération du centre de gravité va nous permettre de les trouver. Ce corps s'appuie sur le plan par des points A, B, C, D, E, F, G, *fig. 43*, dont le nombre est souvent très grand. On peut toujours former avec ces points un polygone convexe tel que ABDEG, c'est-à-dire un polygone qui n'ait pas d'angles rentrants ; plusieurs des points d'appui du corps resteront ordinairement à l'intérieur de ce polygone, comme les

points C, F, et ne concourront pas à sa formation. L'action de la pesanteur sur le corps se traduit, en définitive, par une force ver-



Fig. 43.

ticale égale à son poids et appliquée à son centre de gravité. Pour peu qu'on y réfléchisse, on verra que, si la direction de cette force passe à l'intérieur du polygone dont on vient de parler, le corps se maintiendra sur le plan, sans changer de position; mais que, si elle passe en dehors de ce polygone, elle fera nécessairement basculer le corps, qui prendra ainsi une nouvelle position dans laquelle il

puisse être en équilibre.

Un cylindre oblique, s'appuyant par sa base sur une table, fig. 44,



Fig. 44.



Fig. 45.

restera dans cette position, si la verticale qui passe par son centre de gravité vient rencontrer la table à l'intérieur du cercle de base, cercle qui remplace dans ce cas le polygone convexe dont on a parlé; il n'y a qu'un instant. Mais si ce cylindre oblique a une plus grande longueur, il pourra arriver que la verticale passant par son centre de gravité tombe sur la table en dehors du cercle de base, fig. 45, et

alors le cylindre ne restera pas dans cette position: il tombera nécessairement sur le côté.

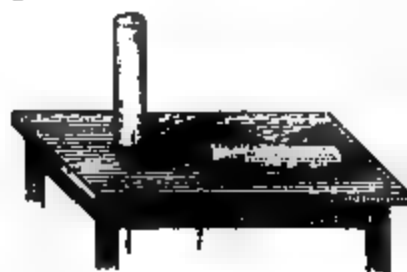


Fig. 46.

Tout le monde connaît ces jouets d'enfant, qui sont formés d'un morceau de moelle de sureau, au bout duquel on a fixé un bouton métallique. Lorsqu'on les pose sur une table, en les couchant sur le côté, fig. 46, ils se redressent immédiatement pour se placer verticalement. Cela tient à ce que la moelle de sureau étant extrême-

est légère, le centre de gravité d'un pareil corps est situé à l'intérieur du bouton métallique ; et que lorsque ce corps est couché sur le côté, la verticale qui passe par son centre de gravité est dirigée en dehors du polygone convexe, formé par ses points d'appui avec la table. La force qui est appliquée au centre de gravité tend alors produire son effet, en abaissant ce point, ce qui oblige le corps à se redresser.

Pour qu'un homme qui se tient debout soit en équilibre, il faut que la verticale qui passe par son centre de gravité soit dirigée à l'intérieur du polygone convexe, qu'on peut former avec les points de contact de ses pieds avec le sol. La *fig. 47* montre la forme de ce polygone, dont toute la surface a été couverte de échures. Si l'on vient à charger cet homme d'un fardeau un peu lourd, il devra changer de position, afin que le centre de gravité du corps total, formé de son corps et du fardeau, satisfasse encore à la condition précédente : s'il porte ce fardeau sur son dos, se penchera en avant ; s'il le tient suspendu à côté de lui à l'aide de sa main droite, il se penchera à gauche. Si cet homme veut saisir de la main, sans se déplacer, un objet un peu éloigné, il allongera son bras et penchera son corps du côté de l'objet : mais en même temps il portera une jambe en arrière, pour maintenir toujours le centre de gravité dans les conditions qui conviennent à l'équilibre.

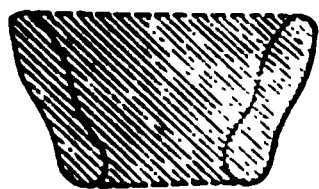


Fig. 47.

§ 43. **Pressions supportées par les points d'appui.** — Un corps pesant qui repose sur un plan horizontal exerce des pressions sur ce plan, en chacun de ses points d'appui. Ces pressions peuvent être déterminées, ainsi que nous allons le voir, toutes les fois que le nombre des points d'appui ne surpasse pas trois.

Si le corps s'appuie sur le plan par un seul point, et qu'il soit en équilibre, il est clair que la pression qu'il exerce en ce seul point d'appui est égale à son poids.

Prenons pour exemple du cas où il y a deux points d'appui, le corps représenté par la *fig. 48*, qui se compose d'un disque circulaire, et d'une tige cylindrique fixée perpendiculairement à ce disque en son centre. Ce corps, posé sur le côté, s'appuiera en deux points A et B, et l'équilibre exige que la verti-

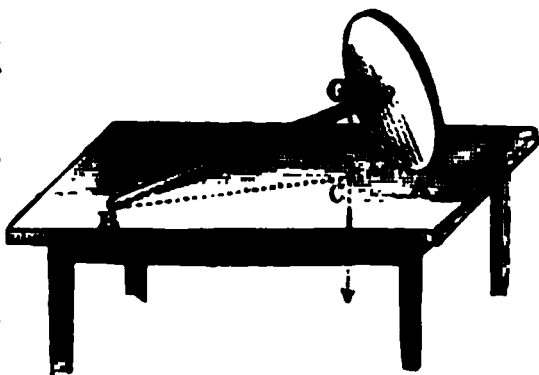


Fig. 48.

cale, menée par son centre de gravité *G*, rencontre le plan en un point *C* de la ligne droite *AB*. Le poids du corps est une force appliquée sui-

vant la verticale GC ; nous pouvons regarder cette force comme provenant de la composition de deux autres forces verticales, appliquées l'une en A , l'autre en B , forces que nous trouverons aisément. Il suffira, en effet, de diviser le poids du corps en deux parties, qui soient entre elles dans le rapport des deux distances AC et CB ; AC étant plus petit que CB , la plus grande des deux forces partielles ainsi obtenues



Fig. 49.

sera la composante appliquée au point A , et l'autre sera la composante appliquée au point B . Ces deux composantes seront précisément les pressions que le corps exerce en ses deux points d'appui.

S'il s'agit d'un corps reposant sur un plan par trois points A, B, C , *fig. 49*, on trouve encore, de la manière suivante, les pressions exercées sur les trois points d'appui. La verticale GO , passant par le centre de gravité G , rencontre le plan en un point O , qui doit être situé à l'intérieur du triangle ABC . Le poids du corps, qui est appliqué en G , peut être regardé comme agissant au point O , et comme provenant de la composition de deux forces verticales, appliquées, l'une en A , l'autre en D . Cette dernière force peut elle-même être décomposée en deux forces verticales, agissant, l'une en B , l'autre en C : en sorte qu'on aura trouvé ainsi trois forces verticales, dont les points d'application sont A, B, C , et qui ont pour résultante le poids du corps. Ces trois forces sont les pressions supportées par les points d'appui A, B, C .

Lorsqu'un corps pesant s'appuie sur un plan par plus de trois points, il n'est plus possible de déterminer les pressions qu'il exerce en ses points d'appui, par la seule connaissance de la position de

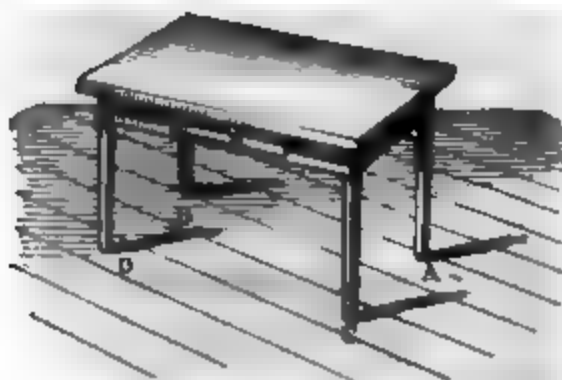


Fig. 50.

son centre de gravité ; l'exemple suivant le fera bien comprendre. Une table, *fig. 50*, posée sur un parquet, s'y appuie par quatre points A, B, C, D . Imaginons que le parquet soit solide en A et D , tandis qu'en B et C il se déchisse sous la moindre pression ; il est bien clair que le poids de la table portera presque tout entier sur les points

A et D , et que les points B et C ne supporteront qu'une pression très faible. Si, au contraire, le parquet était solide en B et C , et

flexible en A et D, la table exercerait en B et C des pressions beaucoup plus fortes qu'en A et D.

Tout ce qu'on peut dire, en général, pour le cas où un corps pesant repose sur un plan horizontal par plus de trois points, c'est que la somme des pressions exercées sur les points d'appui est égale au poids du corps : mais on ne peut, en aucune manière, assigner la valeur de chacune d'elles.

§ 11. **Équilibre d'un corps pesant qui ne peut que tourner autour d'un axe horizontal.** — Lorsqu'un corps solide ne peut se mouvoir qu'en tournant autour d'un axe horizontal, comme une roue hydraulique, ou une moule de rémouleur, la position de son centre de gravité joue un rôle important. Si ce point est situé exactement sur la ligne droite idéale autour de laquelle peut s'effectuer le mouvement de rotation, le corps restera en équilibre dans toutes les positions qu'on pourra lui donner autour de l'axe. L'action de la pesanteur ne tendra nullement à le faire tourner, pour le ramener dans une autre position d'équilibre. On voit, en effet, que cette action se réduisant en définitive à une force appliquée au centre de gravité, la direction de cette force, la seule qu'on suppose appliquée au corps, rencontrera toujours l'axe de rotation, et que cette force ne pourra, en conséquence, faire tourner le corps ni d'un côté ni de l'autre : elle sera détruite par la fixité de l'axe, et ne fera qu'appuyer le corps sur ses supports.

Si, au contraire, le centre de gravité n'est pas situé sur l'axe de rotation, le corps, soumis à la seule action de la pesanteur, ne pourra se maintenir en équilibre que dans deux positions différentes. Lorsqu'on le fait tourner, son centre de gravité décrit une circonférence de cercle, fig. 51, dont le centre est situé sur l'axe de rotation. Il pourra se maintenir en équilibre, dans chacune des positions pour lesquelles ce centre de gravité sera au point le plus bas A, ou au point le plus élevé B de cette circonférence : la direction de la force qui lui est appliquée rencontrant l'axe, cette force ne tendra pas plus à le faire tourner à droite qu'à gauche. Mais toutes les fois que le centre de gravité sera ailleurs qu'en un de ces deux points, la force qui lui est appliquée tendra constamment à l'abaisser, en faisant tourner le corps, soit à droite, soit à gauche. On voit par là que le centre de gravité doit être en A ou en B, pour que le corps ne tende pas à tourner, sous la seule action de la pesanteur : et que l'équilibre sera stable, si le centre de gravité est en A, instable, s'il est en B.



fig. 51.

Pour que l'action de la pesanteur ne gêne en rien le mouvement de rotation qu'on veut donner à un corps autour d'un axe horizontal, on doit donc faire en sorte que son centre de gravité soit situé exactement sur cet axe. C'est ce qu'on fait, par exemple, pour les aiguilles des horloges de grandes dimensions : l'aiguille présente souvent, au delà du centre du cadran, un prolongement court, mais pesant, qu'on a déterminé de manière que le centre de gravité de l'aiguille tout entière soit situé sur l'axe : souvent aussi, afin que l'aiguille ne s'étende pas des deux côtés du centre du cadran, on fixe à la tige qui lui sert d'axe, en arrière du cadran, un contre-poids destiné à produire le même effet. Dans les ateliers où l'on tourne de grosses pièces de fonte ou de fer, on adapte à ces pièces, lorsqu'elles sont montées sur le tour, des masses additionnelles qui ont encore pour objet de ramener le centre de gravité sur l'axe de rotation.

§ 45. L'influence du centre de gravité sur la position d'équilibre d'un corps, qui ne peut que tourner autour d'un axe horizontal, est rendue bien évidente par l'appareil suivant, qui a été désigné sous le nom d'*horloge magique*.

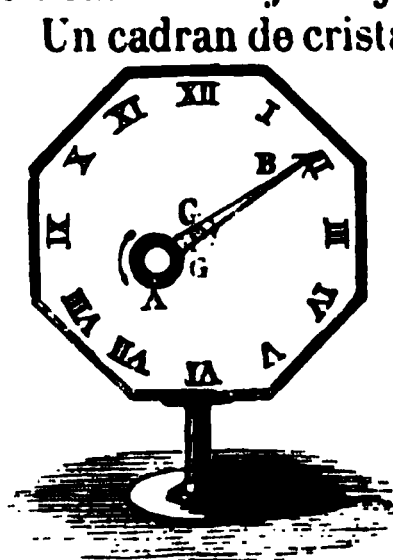


Fig. 52.

Un cadran de cristal transparent, *fig. 52*, est percé en son centre d'un trou, dans lequel peut tourner librement l'axe C d'une aiguille. Cette aiguille, terminée en pointe à l'une de ses extrémités, pour pouvoir indiquer l'heure vers laquelle elle est dirigée, porte à l'autre extrémité un anneau creux, à l'intérieur duquel peut circuler un petit corps assez pesant A. Un mouvement de montre, logé dans l'intérieur de l'aiguille, fait mouvoir uniformément ce corps A sur tout le contour de l'anneau, dans le sens indiqué par la flèche, et lui fait faire ainsi un tour entier

en douze heures. Le déplacement de ce corps détermine un changement de position du centre de gravité de l'aiguille, laquelle tourne en conséquence, pour se mettre à chaque instant dans la direction qui convient à l'équilibre. Pour trouver le centre de gravité de l'aiguille, correspondant à une des positions du mobile A, il faut la regarder comme formée de deux parties, dont l'une est ce mobile, et l'autre tout le reste de l'aiguille. Cela posé, on imaginera qu'au centre de gravité B de cette deuxième partie, on ait appliqué une force verticale égale à son poids, et l'on composera cette force avec le poids du mobile A : on obtiendra ainsi, pour le centre de gravité de l'aiguille tout entière, un point G situé sur la ligne droite AB, et divisant cette ligne en deux segments, BG, AG,

inversement proportionnels aux poids des deux parties de l'aiguille. Pour toutes les autres positions que le petit mobile A occupera à l'intérieur de l'anneau, on trouvera de la même manière le centre de gravité de l'aiguille tout entière, et l'on reconnaîtra que ce centre de gravité décrit aussi, d'un mouvement uniforme, un petit cercle, qui est ponctué sur la *fig. 52* : c'est au centre de ce petit cercle qu'on a fixé l'axe C. A chaque instant la pesanteur dispose l'aiguille de manière à mettre son centre de gravité le plus bas possible. A mesure que ce centre de gravité décrit le petit cercle dont on vient de parler, l'aiguille doit donc tourner en sens contraire, et elle parcourt ainsi uniformément tout le tour du cadran en douze heures. Le mobile A, et le mouvement de montre qui le fait tourner dans l'anneau, étant cachés à l'intérieur de l'aiguille, il semble que cette aiguille marche seule ; et ce qui ajoute à l'illusion, c'est que l'aiguille est parfaitement libre de tourner sous l'impulsion du doigt, et que dès qu'on l'abandonne à elle-même, elle revient exactement dans la position qu'elle occupait, après avoir oscillé pendant quelques instants autour de cette position.

ÉTUDE DE DIVERSES MACHINES, SOUS LE POINT DE VUE DE L'ÉQUILIBRE DES FORCES QUI LEUR SONT APPLIQUÉES.

§ 46. **Pression d'un levier sur son point d'appui.** — Nous avons vu déjà, dans les §§ 28, 29 et 30, à quelle condition doivent satisfaire les forces qui sont appliquées à un levier, pour qu'il soit en équilibre : cherchons maintenant à déterminer la grandeur et la direction de la pression qu'il exerce sur son point d'appui.

Dans le cas du levier droit, représenté par la *fig. 20* (page 21), les deux forces parallèles appliquées aux points A et B auront une résultante égale à leur somme, parallèle à chacune d'elles, et passant par le point C : cette résultante est la pression que le levier exerce sur son point d'appui C.

Pour le levier droit soumis à deux forces parallèles et de sens contraires, *fig. 23* (page 23), on peut regarder la force appliquée au point B comme résultant de la composition de deux forces parallèles, appliquées, l'une au point A, l'autre au point C. La première serait égale et contraire à la force qui agit au point A du levier, et serait détruite par cette force : la seconde serait égale à la différence entre la force qui agit au point B et celle qui agit au point A : c'est cette seconde composante qui représente la pression exercée par le levier sur son point d'appui.

Si un levier, droit ou courbé, est soumis à l'action de deux forces

vant la verticale GC ; nous pouvons regarder cette force comme provenant de la composition de deux autres forces verticales, appliquées l'une en A , l'autre en B , forces que nous trouverons aisément. Il suffira, en effet, de diviser le poids du corps en deux parties, qui soient entre elles dans le rapport des deux distances AC et CB ; AC étant plus petit que CB , la plus grande des deux forces partielles ainsi obtenues



Fig. 49.

sera la composante appliquée au point A , et l'autre sera la composante appliquée au point B . Ces deux composantes seront précisément les pressions que le corps exerce en ses deux points d'appui.

S'il s'agit d'un corps reposant sur un plan par trois points A, B, C , fig. 49, on trouvera encore, de la manière suivante, les pressions

exercées sur les trois points d'appui. La verticale GO , passant par le centre de gravité G , rencontre le plan en un point O , qui doit être situé à l'intérieur du triangle ABC . Le poids du corps, qui est appliqué en G , peut être regardé comme agissant au point O , et comme provenant de la composition de deux forces verticales, appliquées, l'une en A , l'autre en D . Cette dernière force peut elle-même être décomposée en deux forces verticales, agissant, l'une en B , l'autre en C : en sorte qu'on aura trouvé ainsi trois forces verticales, dont les points d'application sont A, B, C , et qui ont pour résultante le poids du corps. Ces trois forces sont les pressions supportées par les points d'appui A, B, C .

Lorsqu'un corps pesant s'appuie sur un plan par plus de trois points, il n'est plus possible de déterminer les pressions qu'il exerce en ses points d'appui, par la seule connaissance de la position de

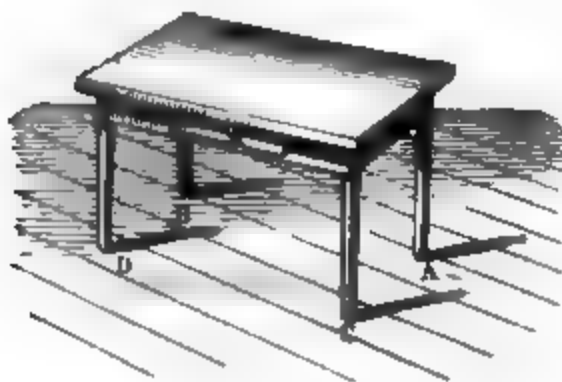


Fig. 50.

son centre de gravité; l'exemple suivant le fera bien comprendre. Une table, fig. 50, posée sur un parquet, s'y appuie par quatre points A, B, C, D . Imaginons que le parquet soit solide en A et D , tandis qu'en B et C il fléchisse sous la moindre pression; il est bien clair que le poids de la table portera presque tout entier sur les points

A et D , et que les points B et C ne supporteront qu'une pression très faible. Si, au contraire, le parquet était solide en B et C , et

flexible en A et D, la table exercerait en B et C des pressions beaucoup plus fortes qu'en A et D.

Tout ce qu'on peut dire, en général, pour le cas où un corps pesant repose sur un plan horizontal par plus de trois points, c'est que la somme des pressions exercées sur les points d'appui est égale au poids du corps ; mais on ne peut, en aucune manière, assigner la valeur de chacune d'elles.

§ 44. **Équilibre d'un corps pesant qui ne peut que tourner autour d'un axe horizontal.** — Lorsqu'un corps solide ne peut se mouvoir qu'en tournant autour d'un axe horizontal, comme une roue hydraulique, ou une meule de rémouleur, la position de son centre de gravité joue un rôle important. Si ce point est situé exactement sur la ligne droite idéale autour de laquelle peut s'effectuer le mouvement de rotation, le corps restera en équilibre dans toutes les positions qu'on pourra lui donner autour de l'axe. L'action de la pesanteur ne tendra nullement à le faire tourner, pour le ramener dans une autre position d'équilibre. On voit, en effet, que cette action se réduisant en définitive à une force appliquée au centre de gravité, la direction de cette force, la seule qu'on suppose appliquée au corps, rencontrera toujours l'axe de rotation, et que cette force ne pourra, en conséquence, faire tourner le corps ni d'un côté ni de l'autre : elle sera détruite par la fixité de l'axe, et ne fera qu'appuyer le corps sur ses supports.

Si, au contraire, le centre de gravité n'est pas situé sur l'axe de rotation, le corps, soumis à la seule action de la pesanteur, ne pourra se maintenir en équilibre que dans deux positions différentes. Lorsqu'on le fait tourner, son centre de gravité décrit une circonférence de cercle, fig. 54, dont le centre est situé sur l'axe de rotation.

Il pourra se maintenir en équilibre, dans chacune des positions pour lesquelles ce centre de gravité sera au point le plus bas A, ou au point le plus élevé B de cette circonférence : la direction de la force qui lui est appliquée rencontrant l'axe, cette force ne tendra pas plus à le faire tourner à droite qu'à gauche. Mais toutes les fois que le centre de gravité sera ailleurs qu'en un de ces deux points, la force qui lui est appliquée tendra constamment à l'abaisser, en



Fig. 54.

faisant tourner le corps, soit à droite, soit à gauche. On voit par là que le centre de gravité doit être en A ou en B, pour que le corps ne tende pas à tourner, sous la seule action de la pesanteur, et que l'équilibre sera stable, si le centre de gravité est en A, instable, s'il est en B.

Pour que l'action de la pesanteur ne gêne en rien le mouvement de rotation qu'on veut donner à un corps autour d'un axe horizontal, on doit donc faire en sorte que son centre de gravité soit situé exactement sur cet axe. C'est ce qu'on fait, par exemple, pour les aiguilles des horloges de grandes dimensions : l'aiguille présente souvent, au delà du centre du cadran, un prolongement court, mais pesant, qu'on a déterminé de manière que le centre de gravité de l'aiguille tout entière soit situé sur l'axe : souvent aussi, afin que l'aiguille ne s'étende pas des deux côtés du centre du cadran, on fixe à la tige qui lui sert d'axe, en arrière du cadran, un contre-poids destiné à produire le même effet. Dans les ateliers où l'on tourne de grosses pièces de fonte ou de fer, on adapte à ces pièces, lorsqu'elles sont montées sur le tour, des masses additionnelles qui ont encore pour objet de ramener le centre de gravité sur l'axe de rotation.

§ 45. L'influence du centre de gravité sur la position d'équilibre d'un corps, qui ne peut que tourner autour d'un axe horizontal, est rendue bien évidente par l'appareil suivant, qui a été désigné sous le nom d'*horloge magique*.

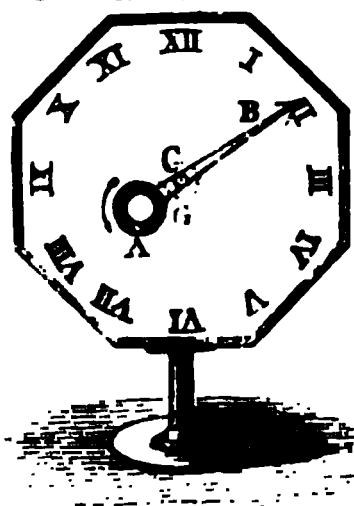


Fig. 52.

Un cadran de cristal transparent, *fig. 52*, est percé en son centre d'un trou, dans lequel peut tourner librement l'axe C d'une aiguille. Cette aiguille, terminée en pointe à l'une de ses extrémités, pour pouvoir indiquer l'heure vers laquelle elle est dirigée, porte à l'autre extrémité un anneau creux, à l'intérieur duquel peut circuler un petit corps assez pesant A. Un mouvement de montre, logé dans l'intérieur de l'aiguille, fait mouvoir uniformément ce corps A sur tout le contour de l'anneau, dans le sens indiqué par la flèche, et lui fait faire ainsi un tour entier en douze heures. Le déplacement de ce corps détermine un changement de position du centre de gravité de l'aiguille, laquelle tourne en conséquence, pour se mettre à chaque instant dans la direction qui convient à l'équilibre. Pour trouver le centre de gravité de l'aiguille, correspondant à une des positions du mobile A, il faut la regarder comme formée de deux parties, dont l'une est ce mobile, et l'autre tout le reste de l'aiguille. Cela posé, on imaginera qu'au centre de gravité B de cette deuxième partie, on ait appliqué une force verticale égale à son poids, et l'on composera cette force avec le poids du mobile A : on obtiendra ainsi, pour le centre de gravité de l'aiguille tout entière, un point G situé sur la ligne droite AB, et divisant cette ligne en deux segments, BG, AG,

inversement proportionnels aux poids des deux parties de l'aiguille. Pour toutes les autres positions que le petit mobile A occupera à l'intérieur de l'anneau, on trouvera de la même manière le centre de gravité de l'aiguille tout entière, et l'on reconnaîtra que ce centre de gravité décrit aussi, d'un mouvement uniforme, un petit cercle, qui est ponctué sur la *fig. 52* : c'est au centre de ce petit cercle qu'on a fixé l'axe C. A chaque instant la pesanteur dispose l'aiguille de manière à mettre son centre de gravité le plus bas possible. A mesure que ce centre de gravité décrit le petit cercle dont on vient de parler, l'aiguille doit donc tourner en sens contraire, et elle parcourt ainsi uniformément tout le tour du cadran en douze heures. Le mobile A, et le mouvement de montre qui le fait tourner dans l'anneau, étant cachés à l'intérieur de l'aiguille, il semble que cette aiguille marche seule : et ce qui ajoute à l'illusion, c'est que l'aiguille est parfaitement libre de tourner sous l'impulsion du doigt, et que dès qu'on l'abandonne à elle-même, elle revient exactement dans la position qu'elle occupait, après avoir oscillé pendant quelques instants autour de cette position.

ÉTUDE DE DIVERSES MACHINES, SOUS LE POINT DE VUE DE L'ÉQUILIBRE DES FORCES QUI LEUR SONT APPLIQUÉES.

§ 46. Pression d'un levier sur son point d'appui. — Nous avons vu déjà, dans les §§ 28, 29 et 30, à quelle condition doivent satisfaire les forces qui sont appliquées à un levier, pour qu'il soit en équilibre : cherchons maintenant à déterminer la grandeur et la direction de la pression qu'il exerce sur son point d'appui.

Dans le cas du levier droit, représenté par la *fig. 20* (page 21), les deux forces parallèles appliquées aux points A et B auront une résultante égale à leur somme, parallèle à chacune d'elles, et passant par le point C : cette résultante est la pression que le levier exerce sur son point d'appui C.

Pour le levier droit soumis à deux forces parallèles et de sens contraires, *fig. 23* (page 23), on peut regarder la force appliquée au point B comme résultant de la composition de deux forces parallèles, appliquées, l'une au point A, l'autre au point C. La première serait égale et contraire à la force qui agit au point A du levier, et serait détruite par cette force ; la seconde serait égale à la différence entre la force qui agit au point B et celle qui agit au point A : c'est cette seconde composante qui représente la pression exercée par le levier sur son point d'appui.

Si un levier, droit ou courbé, est soumis à l'action de deux forces

qui ne sont pas parallèles, il ne pourra être en équilibre qu'autant que les directions de ces deux forces se rencontreront en un point D, fig. 53, et que leurs grandeurs satisferont à la condition énoncée



Fig. 53.

précédemment (§ 29). Ces forces auront une résultante, qu'on obtiendra en construisant le parallélogramme DEGF, et qui sera nécessairement dirigée vers le point d'appui C du levier : car, sans cela, elle tendrait à faire tourner le levier autour de ce point, soit à droite, soit à gauche. Cette résultante, représentée par la diagonale DG, n'est autre chose que la pression que le levier exerce sur son point d'appui. On voit que, si l'on mène par le point C deux lignes CH et CK, respectivement égales et parallèles aux lignes qui représentent les forces appliquées aux points A et B, la diagonale CL du parallélogramme construit sur ces deux lignes aura la même grandeur et la même direction que la ligne DG : elle représentera donc, aussi bien que cette dernière ligne, la pression supportée par le point d'appui. C'est ordinairement ainsi, en construisant le parallélogramme CHKL, qu'on détermine la pression supportée par le point d'appui.



Fig. 54.

§ 47. **Balance.** — La balance est un instrument qui sert à peser les corps, c'est-à-dire à déterminer le nombre de grammes ou de kilogrammes qui représente le poids de chacun d'eux. Elle se compose essentiellement d'un levier, nommé *fléau*, dont le point d'appui est au milieu de sa longueur, et dont les extrémités supportent deux plateaux, fig. 54. Il est nécessaire que le fléau soit très mobile autour de son point d'appui, et que ce point

reste toujours exactement au milieu de sa longueur, pendant qu'il oscille de part et d'autre de sa position d'équilibre. Pour cela, il est

un couteau d'acier, qui lui est fixé transversalement en son milieu et qui fait saillie des deux côtés : ce couteau présente une arête saillante, mais non tranchante, tournée vers le bas, et par laquelle le fléau repose sur deux petits plans d'acier, ou d'agate, disposés symétriquement, l'un en avant du fléau, l'autre en arrière, et fixés solidement. Les oscillations du fléau s'effectuent autour de ce point d'appui, qui fait fonction d'axe de rotation.

Les deux extrémités du fléau présentent deux couteaux analogues à celui qui vient d'être décrit, mais disposés de manière à tourner leurs arêtes vers le haut : c'est sur ces deux arêtes que viennent se fixer les crochets auxquels sont fixées les chaînes qui supportent les plateaux.

On sert de la balance en plaçant dans un des plateaux le corps qu'on veut peser, et dans l'autre des poids marqués, en quantité variable, jusqu'à ce que pour établir l'équilibre, c'est-à-dire pour que le fléau se maintienne horizontal. Il suffit alors, si la balance est juste, de lire le nombre de grammes ou de kilogrammes que représentent les poids marqués qu'on a employés, et l'on a ainsi le poids du corps. Pour qu'une balance soit juste, il faut qu'elle remplisse deux conditions : 1° les distances du point d'appui du fléau aux points de suspension des plateaux doivent être égales ; 2° lorsque aucun corps n'est placé dans les plateaux, le fléau doit être horizontal. On voit que, ces conditions étant remplies, si le fléau reste horizontal lorsqu'on aura mis deux corps dans les plateaux, les poids de ces deux corps devront être égaux : puisque ces poids sont deux qui se font équilibre, en agissant sur le fléau, aux extrémités de ses bras de levier égaux.

On se contente souvent, pour s'assurer de la justesse d'une balance, de vérifier si la seconde des conditions précédentes est remplie ; mais cela ne suffit pas. La balance peut être très inexacte, quoique cette vérification ait réussi, parce qu'elle ne prouve en aucune manière l'égalité des bras de levier du fléau. Pour être certain que la balance est juste, on opérera de la manière suivante : pour avoir reconnu que le fléau se maintient bien horizontalement, lorsque les plateaux ne renferment aucun corps, on mettra dans ces plateaux des poids tellement choisis que le fléau reste horizontal : on retirera ensuite ces poids de place, en mettant dans le plateau de gauche le poids qui était dans le plateau de droite, et inversement, et si le fléau ne cesse pas d'être horizontal, on sera sûr que la balance est juste. Si les bras de levier du fléau étaient inégaux, les poids mis dans les plateaux, et qui se faisaient équilibre en agissant aux extrémités de ces bras de levier, devaient être aussi inégaux. Le

plus grand agissant sur le petit bras de levier, et le plus petit sur le grand bras de levier. En changeant ces poids de place, on aurait ainsi appliqué le plus grand au grand bras de levier, le plus petit au petit bras de levier : ces poids n'auraient donc pas pu se faire équilibre, dans leur nouvelle position, et le fléau ne serait pas resté horizontal.

§ 48. **Sensibilité d'une balance.** — Pour qu'une balance puisse servir à déterminer très exactement le poids d'un corps, il ne suffit pas qu'elle soit juste, il faut encore qu'elle soit très sensible : c'est-à-dire que, lorsque le fléau se maintient horizontalement, sous l'action de deux poids égaux placés dans les plateaux, si l'on vient à ajouter, d'un côté seulement, un très petit poids, un milligramme, par exemple, le fléau doit se déplacer immédiatement pour prendre une nouvelle position d'équilibre, visiblement différente de celle qu'il occupait. En outre, une bonne balance doit présenter le même degré de sensibilité, quels que soient les poids des corps placés dans ses deux plateaux. Pour qu'il en soit ainsi, la balance doit satisfaire aux conditions suivantes : 1° le point d'appui du fléau et les points de suspension des plateaux doivent être en ligne droite : 2° le centre de gravité du fléau doit être au-dessous de son point d'appui, et très près de ce point.

On voit en effet que, quels que soient les poids égaux qu'on aura mis dans les deux plateaux, les poids de ces plateaux, ainsi chargés, seront deux forces égales appliquées aux deux points A et B de suspension, *fig. 55* : ces deux forces auront une



Fig. 55.

résultante passant par le point d'appui C du fléau, résultante qui sera détruite par la fixité de ce point, quelle que soit la direction de la ligne AB, horizontale ou oblique. Le fléau se trouvera donc dans les mêmes

conditions que si les plateaux n'étaient pas suspendus à ses extrémités, et il ne prendra une position horizontale que sous l'action de son poids, appliqué à son centre de gravité G. Une différence d'un gramme, par exemple, entre les poids des corps mis dans les plateaux, produira donc le même effet que si le fléau était simplement soumis à une force d'un gramme, appliquée à une de ses extrémités A : sous l'action de cette force, il s'inclinera, et ne s'arrêtera dans une position A' B', que quand son poids, appliqué à son centre de gravité G', fera équilibre à la force qui l'a dérangé de sa première position. On comprend aisément par là qu'une même différence entre les poids des corps mis dans les deux plateaux pro-

aura toujours une même inclinaison du fléau, quels que soient ces poids : et que cette inclinaison sera d'autant plus marquée que le centre de gravité G du fléau sera plus près de son point d'appui C . Une balance qui remplit les conditions qu'on vient d'énoncer sera cependant d'être sensible, lorsqu'on chargera ses plateaux de corps très pesants : parce que, d'une part, le fléau fléchira, et les points A , B et C ne seront plus en ligne droite ; et que, d'une autre part, les arêtes des couteaux de suspension se déformeront, sous la pression très grande qu'elles auront à supporter, ce qui diminuera beaucoup la mobilité du fléau.

En cherchant à atténuer autant que possible ces deux effets, on vient à obtenir des balances capables de peser, avec précision, des corps dont les poids varient entre des limites très étendues. C'est ainsi que M. Deleuil a construit une balance qui est sensible à l'addition d'un milligramme dans un des plateaux, même lorsque ces plateaux contiennent des poids de 10^k chacun.

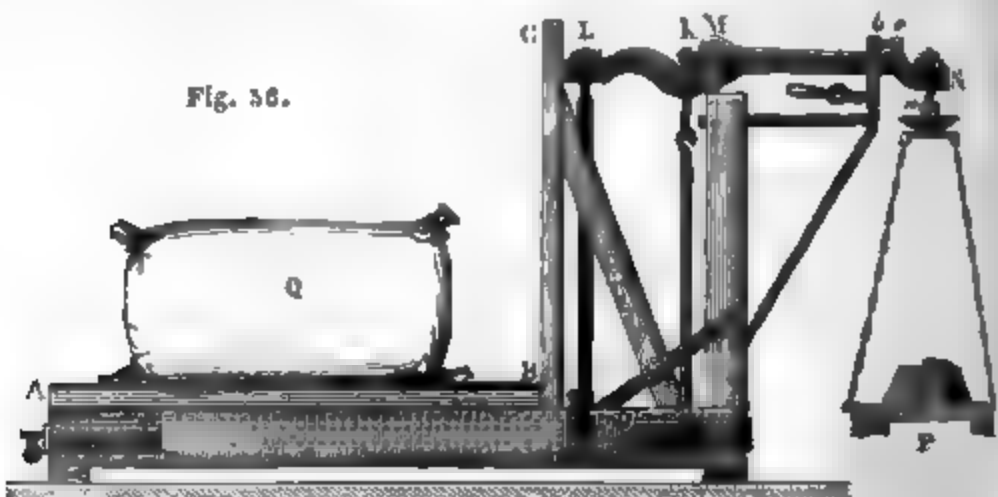
Lorsqu'une balance est très sensible, l'addition d'un très petit poids dans un des plateaux la dérange de sa position d'équilibre : elle ne s'arrête à une autre position qu'après avoir effectué une série d'oscillations, de part et d'autre de cette nouvelle position d'équilibre. Pour qu'on ne soit pas obligé d'attendre que les oscillations aient cessé, ce qui pourrait être long, on fixe au fléau une aiguille qui oscille en même temps que lui, et dont l'extrémité se balancé le long d'un arc de cercle divisé ; lorsqu'on voit que l'aiguille, en oscillant, s'écarte également de chaque côté du point de l'arc de cercle qui correspond à l'horizontalité du fléau, on est assuré que les poids mis dans les plateaux sont égaux, et l'on n'a pas besoin d'attendre que le fléau soit immobile, pour reconnaître s'il est horizontal.

§ 19. **Méthode des doubles pesées.** — Pour effectuer des pesées très exactes, on emploie toujours une méthode due à Borda, connue sous le nom de *méthode des doubles pesées*. Voici en quoi elle consiste.

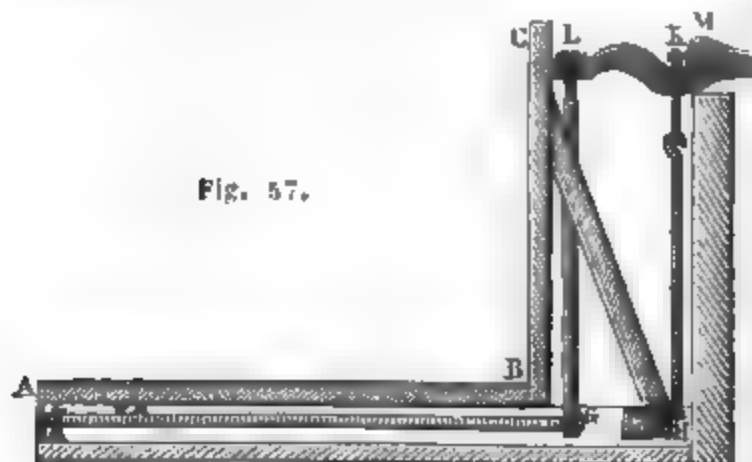
Après avoir mis le corps à peser dans un des plateaux d'une balance, on lui fait équilibre, en mettant dans l'autre plateau de la même balance une maille de plomb ou du sable. L'équilibre étant bien établi, on enlève le corps, et on le remplace par des poids marqués, en quantité croissante, jusqu'à ce que le fléau reprenne la position horizontale, ou du moins qu'il oscille également de part et d'autre de cette position. Il est bien évident que ces poids marqués, produisant exactement le même effet que le corps, dans les mêmes circonstances, doivent avoir de mesure à son poids.

Dans l'emploi de cette méthode ingénieuse, on voit que l'exactitude du résultat ne dépend nullement de la justesse de la balance, mais seulement de sa sensibilité. Une mauvaise balance, pourvu qu'elle soit sensible, pourra ainsi servir à effectuer des pesées très délicates.

§ 50. **Balance de Quintenz.** — La balance de Quintenz, ainsi appelée du nom de son inventeur, est beaucoup employée dans le commerce, et pour peser les bagages, dans les bureaux des messageries ou des chemins de fer. Cette balance est aussi souvent désignée sous le nom de bascule. Elle est représentée par la fig. 56.



la fig 57 est destinée à en montrer le mécanisme d'une manière plus claire.



Un plateau AB, dont un des bords se relève en BC, est destiné à recevoir les corps qu'on veut peser. Ce plateau, qui fait corps avec la pièce D, s'appuie d'une part en E sur le levier FG, et d'une autre part, en H, il est

accroché dans l'anneau qui termine inférieurement la tringle HK. Le levier FG, mobile autour du point F, s'appuie sur l'extrémité inférieure de la tringle GL. Les deux tringles HK et GL s'appuient

le, la distance EM est exactement égale au double
MN.

que, le plateau AB ne portant aucun corps, le levier
est en équilibre sous l'action de son propre poids, du poids du
des pressions exercées en K et L par les tiges qui s'y
sont appliquées qui proviennent des poids de diverses parties.
Si l'on place un corps Q sur le plateau AB, le poids
se répartira entre les deux points d'appui E, H du pla-
teau. Le poids qui agira au point H donnera lieu à une
pression appliquée en K au levier LN. L'autre portion de ce
poids qui agira au point E du levier FG, exercera, par l'intermé-
diaire du levier, une pression cinq fois plus petite sur l'extrémité
de la tringle GL ; cette pression, qui se transmettra
de la tringle GL au point L du levier LN, produira sur ce
levier le même effet qu'une pression cinq fois plus grande agissant
au point L. On voit donc que ce sera exactement comme si la seconde
portion du poids Q agissait directement sur le point K. Le levier LN
est donc dans les mêmes conditions que si le poids du corps Q
était tout entier en K ; et, pour lui faire équilibre, il faudra
mettre sur le plateau P un poids dix fois plus petit.

Pour servir de cette balance, on doit d'abord s'assurer, avant
de mettre un corps sur le plateau AB, que le levier LN se tient
en équilibre. On est ordinairement obligé pour cela de mettre
des poids dans le plateau P ; ces poids forment ce que l'on
appelle des poids de comparaison : pour ne pas les confondre avec les nouveaux poids
on les met habituelle-

tour de ce point. Au point A est disposé un crochet, quelquefois un plateau. Un anneau D, qui peut glisser le long de CB, supporte

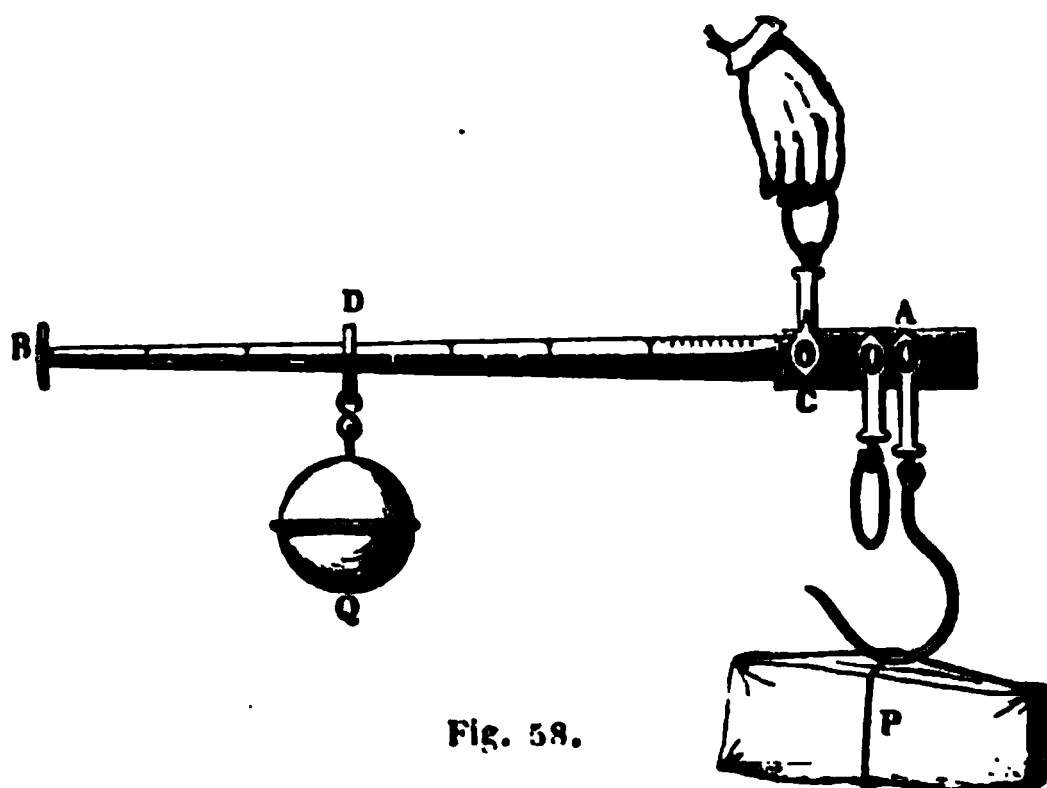


Fig. 58.

poids Q. Lorsqu'on a suspendu un corps P au crochet, on fait glisser l'anneau D, jusqu'à ce que le levier AB reste horizontal. La position de cet anneau, dépendant du poids du corps, peut servir à le déterminer : il suffit pour cela qu'on ait gradué d'avance la partie BC du levier, c'est-à-dire qu'on ait marqué les points où s'arrête l'anneau, lorsque le corps suspendu au crochet pèse 1^k , 2^k , 3^k , etc.

La balance romaine est souvent munie de deux anneaux de suspension, comme le montre la *fig. 58*; alors le crochet, qui doit supporter le corps à peser, peut tourner autour de l'extrémité du levier, de manière à se diriger toujours vers le bas, quel que soit celui des deux anneaux de suspension dont on se serve. Quand on veut peser des corps peu lourds, on suspend la balance par l'anneau le plus éloigné du point A, comme dans la *fig. 58*; mais, pour peser des corps dont le poids est un peu grand, on retourne l'instrument, pour le suspendre par l'autre anneau, afin de donner un plus petit bras de levier à ce poids.

§ 52. **Peson.** — Le peson est destiné, comme la balance romaine, à déterminer le poids d'un corps sans l'emploi d'aucun poids marqué. La *fig. 59* représente un peson de petites dimensions, disposé spécialement pour peser les lettres, et qui est désigné pour cela sous le nom de *pèse-lettre*. Le levier coudé ACB peut tourner autour du point C. Le centre de gravité G de ce levier tend à venir se placer sur la verticale qui passe par le centre de rotation C : mais il en est

par l'action du poids d'un plateau E suspendu au point A. On charge ce plateau, le levier tourne, et l'extrémité B se meut sur un arc de cercle; cet arc a été tracé d'avance, en sorte qu'on puisse, sur chaque position du point B, peser le poids du corps qui a été placé sur le plateau. Le renflement D, au bout du levier coudé, a pour objet de placer le centre de gravité à une distance suffisamment grande du point de rotation.

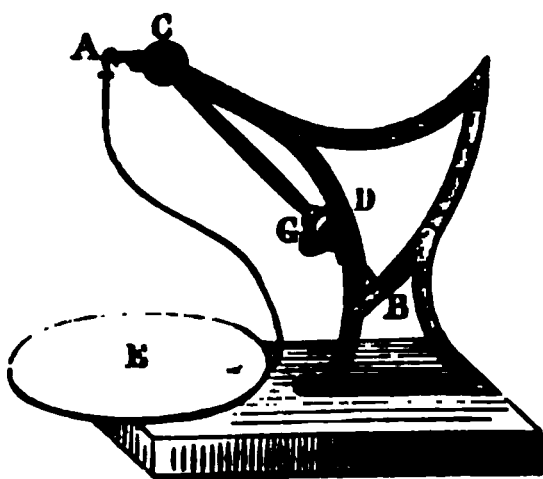


Fig. 59.

Poulie. — La poulie est un anneau circulaire, qui présente sur sa

circumference, une rainure qu'on nomme sa gorge, et qui peut tourner librement autour d'un axe qui le traverse en son centre. L'axe peut être fixé à la poulie, et alors ses deux extrémités tournent dans deux ouvertures circulaires pratiquées dans une chape qui embrasse la poulie; ou bien l'axe est fixé à la chape, et la poulie tourne dans une ouverture circulaire percée au centre de la chape, ainsi la poulie peut tourner indépendamment de cet axe. Une corde s'enroule dans la gorge de la poulie, s'applique sur une portion de son contour, et s'en détache ensuite de part et d'autre, suivant les directions de deux tangentes à sa circonférence.

Fig. 60 représente une poulie dont la chape est attachée à un point fixe; la corde qui passe dans sa gorge a un poids à une de ses extrémités, et une traction qui doit maintenir ce poids en équilibre. Les deux forces, qui agissent suivant les deux parties rectilignes de la corde, sont dans les mêmes conditions que si elles agissaient aux deux extrémités d'un levier coudé formé des deux parties de la corde qui joignent le centre de la poulie aux points de contact A et B des deux cordes avec sa circonférence: et comme les bras de ce levier sont égaux, il s'ensuit que la force de traction doit être égale au poids du corps qu'elle maintient en équilibre.

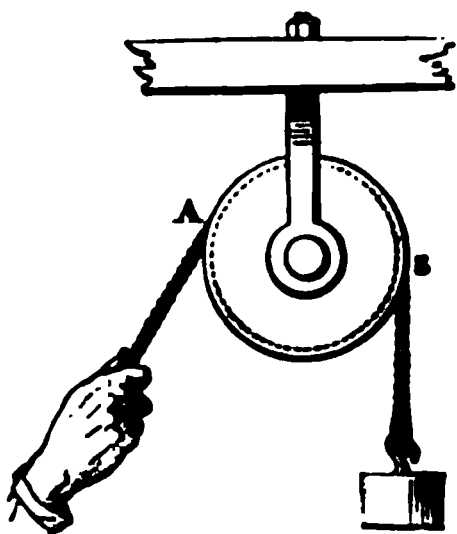


Fig. 60.

La poulie peut être encore employée comme l'indiquent les fig. 61 et 62. Dans la fig. 61, la chape est alors munie d'un crochet auquel on peut suspendre un poids. Une des extrémités de la corde est fixée à un point F, et

à l'autre extrémité est appliquée une force de traction. L'équilibre étant établi, les deux cordons qui se détachent de la poulie,

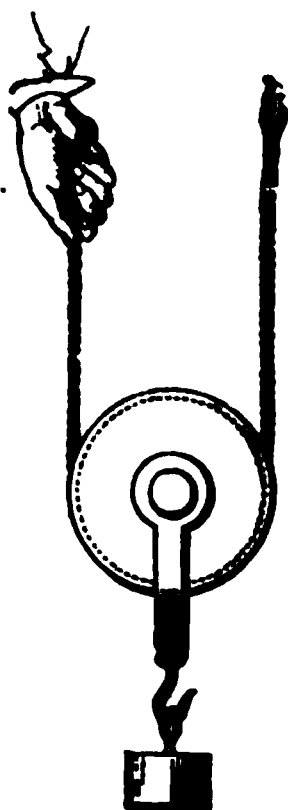


Fig. 61.

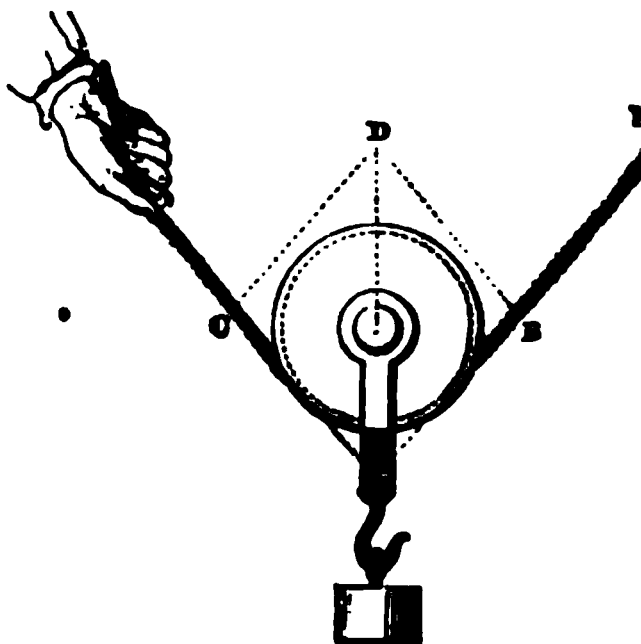


Fig. 62.

et d'autre, doivent être également tendus, et la résultante des tensions doit être égale au poids du corps que la poulie supporte. Dans le cas de la *fig. 61*, la force de traction sera donc la même que ce poids. Dans le cas de la *fig. 62*, on prolongera les deux cordons jusqu'à leur rencontre en A ; on mènera par ce point une verticale sur laquelle on prendra une longueur AD représentant le poids que la poulie est chargée ; enfin on mènera DB, DC parallèles aux cordons : les lignes AB, AC ainsi obtenues représenteront les tensions des deux cordons, et la force de traction sera égale à la somme d'elles. Les tensions des cordons étant égales, il en résulte que les lignes AB, AC devront avoir la même longueur, et par conséquent les deux cordons devront être également inclinés sur la verticale.

§ 54. **Moufles.** — Les moufles sont des machines formées de la réunion de plusieurs poulies sur une même chape. La *fig. 63* représente un système de moufles dont chacune est formée de deux poulies tournant autour d'un même axe : chaque poulie tourne d'ailleurs indépendamment des autres. La chape de la moufle inférieure est fixée à l'aide du crochet qui la termine. Une corde s'attache par une de ses extrémités à cette chape ; de là elle descend et passe dans la gorge d'une des poulies inférieures ; puis elle remonte, et passe dans la gorge d'une des poulies supérieures ; elle redescend ensuite, pour passer dans la gorge d'une seconde

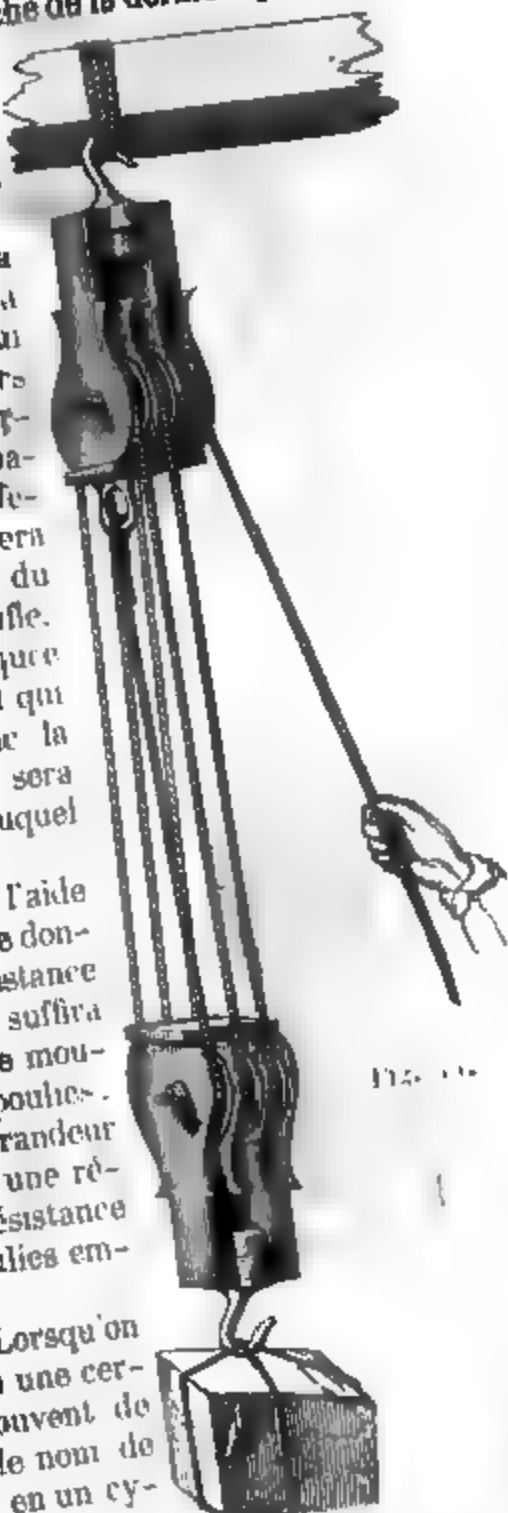
TOLK, OU TREUIL.

re, et ainsi de suite, jusqu'à ce que, ayant embrassé les des diverses poulies, elle se détache de la dernière poulie supérieure. A la seconde extrémité de la corde est appliquée une force déterminée, destinée à mettre en équilibre le poids du corps que l'on suspend au-dessous de la moufle inférieure.

Lorsqu'on suit la corde dans toute sa longueur, on verra qu'elle a partout la même tension, puisque les cordons qui la forment sont tous également tendus. D'ailleurs six cordons soutiennent la moufle inférieure : la tension de chacun d'eux sera donc la sixième partie du poids du corps qui est suspendu à cette moufle. La force de traction qui est appliquée à l'extrémité libre de la corde, et qui détermine cette tension, aura donc la même valeur, c'est-à-dire qu'elle sera six fois plus petite que le poids auquel elle fait équilibre.

A l'aide des mouffles, comme à l'aide du levier, on peut, avec une force donnée, faire équilibre à une résistance aussi grande qu'on voudra. Il suffira pour cela de réunir dans chaque moufle un assez grand nombre de poulies. Car on voit que, pour avoir la grandeur de la force capable de vaincre une résistance, il faut diviser cette résistance par le nombre total des poulies employées.

§ 53. **Tour, ou Treuil.** — Lorsqu'on veut élever un corps pesant à une certaine hauteur, on se sert souvent de la machine désignée sous le nom de tour, ou treuil. Elle consiste en un cylindre A, fig. 64, quelquefois de fonte, mais plus ordinairement de bois, qui est terminé à ses deux extrémités par deux tourillons B, reposant dans des coussinets fixe



Le cylindre, qui n'est appuyé que par ses tourillons, peut tourner autour de son axe. Une corde, dont un bout est fixé sur le contour du cylindre, est at-

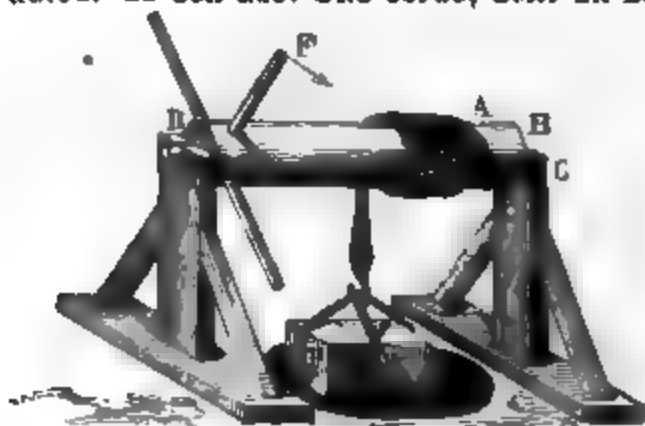


Fig. 64.

tachée par son autre bout au corps P, qu'il s'agit d'élever. On fait tourner le cylindre, en agissant aux extrémités de leviers qui lui sont fixés ou bien qu'on introduit successivement dans des trous pratiqués sur son contour; la corde s'enroule, et elle fait

monter le corps auquel elle est attachée.

Pour trouver la relation qui existe entre le poids du corps qui monte et la force qui le fait monter, nous observerons qu'il importe peu que le levier sur lequel agit la force soit implanté en tel point ou en tel autre point de la surface du tour; pourvu que ce levier conserve la même longueur, et que la force lui soit appliquée au même point, et perpendiculairement à sa longueur, cette force devra



Fig. 65.

toujours avoir la même intensité pour soulever le poids. Nous pourrions donc admettre, pour simplifier, que la corde qui supporte le poids, et le levier sur lequel agit la force, soient situés dans un même plan perpendiculaire à l'axe du tour. Dès lors les deux forces P et F, fig. 65, se trouvent évidemment dans les mêmes conditions que si elles étaient appliquées aux deux extrémités du levier courbé MON: c'est-à-dire que, pour qu'il y ait équilibre, elles doivent être dans le rapport inverse du rayon OM du tour, et de la longueur ON du levier. Si, par exemple, ON est égal à cinq fois OM, la force F devra être la cin-

quième partie du poids P.

§ 56. **Cabestan.** — Le cabestan est un tour, dont l'axe est placé verticalement, fig. 66, et qui est employé, surtout dans les ports de mer, pour exercer de très grands efforts dans une direction horizontale ou presque horizontale. Le tourillon supérieur se prolonge au-dessus du coussinet dans lequel il tourne, et c'est à ce prolongement que sont adaptés quatre, six, ou même huit leviers, disposés réguli-

rement sur son contour. La charpente qui porte les deux coussinets, et qui est simplement posée sur le sol, doit rester immobile pendant la manœuvre du cabestan : à cet effet elle est reliée par des cordes à des piquets solidement enfoncés en terre. Comme le tour est ordinairement très peu élevé, et que le câble sur lequel on doit exercer une force de traction est souvent très long, il serait difficile d'opérer, comme on l'a dit

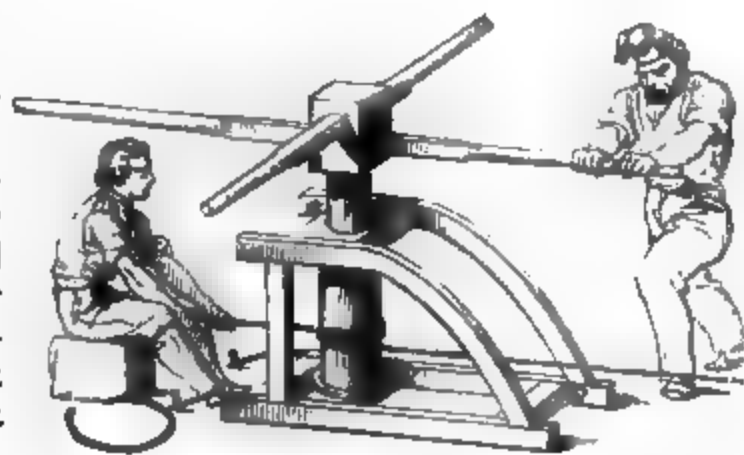


Fig. 66.

dans le paragraphe précédent, en enroulant le câble de plus en plus sur la surface du tour : aussi agit-on autrement. On fait faire au câble deux ou trois fois le tour du cylindre, puis on en remet l'extrémité libre entre les mains d'un homme, *fig. 66*, qui la tire avec une force suffisante pour empêcher le câble de glisser. De cette manière, lorsque des hommes agissent sur les extrémités des leviers, pour faire tourner le cabestan, le câble est entraîné par simple adhérence, et tandis qu'il s'enroule d'un côté, il se déroule de l'autre ; il n'y a donc jamais que la même quantité de câble qui soit enroulée. Pour faciliter l'adhérence du câble sur la surface du tour, et présenter un plus grand obstacle à ce qu'il puisse glisser, on pratique souvent des cannelures longitudinales sur cette surface.

Quant à la relation qui existe entre la résistance vaincue et la force appliquée à l'extrémité d'un des leviers, pour vaincre cette résistance, on la trouvera de même que lorsqu'il s'agissait d'un tour à axe horizontal. On observera seulement que la force de traction exercée par l'homme qui tient la partie du câble qui se déroule fait équilibre à une portion égale de la résistance totale à vaincre, l'excédant de cette résistance sera mis en équilibre par une force 8, 10 ou 12 fois plus petite, agissant à l'extrémité d'un des leviers, si ce levier est 8, 10 ou 12 fois plus long que le rayon du tour. Si, au lieu d'un seul homme agissant sur un des leviers, il y en a plusieurs qui poussent autant de leviers, ils n'auront à eux tous à exercer que la même pression totale ; c'est-à-dire que la somme des forces qu'ils appliqueront aux différents leviers sera égale à la force que devrait appliquer un seul homme pour vaincre la même résistance.

à l'autre extrémité est appliquée une force de traction. L'équilibre étant établi, les deux cordons qui se détachent de la poulie,

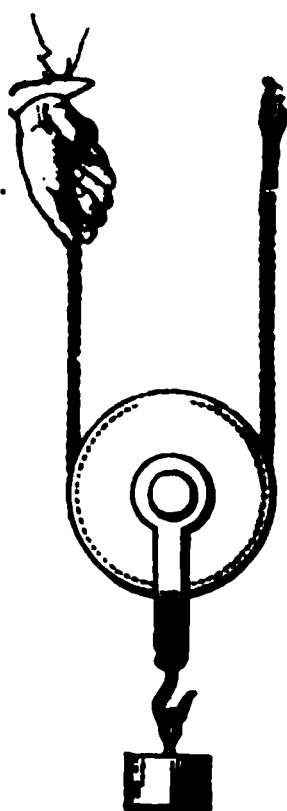


Fig. 61.

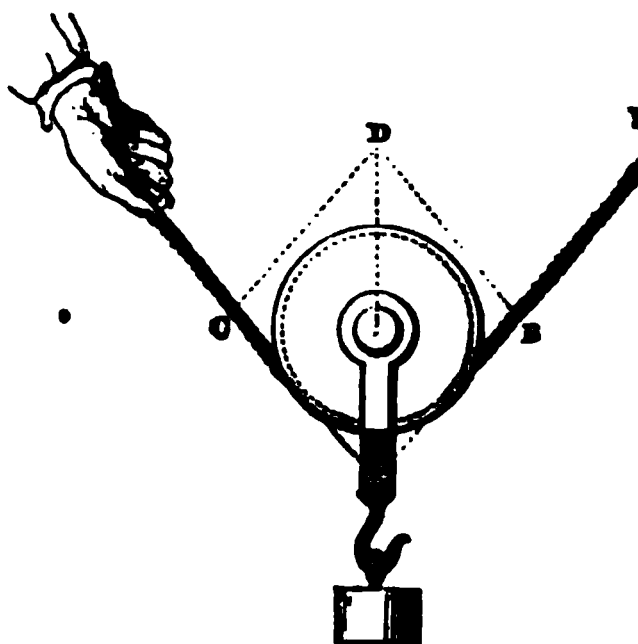


Fig. 62.

et d'autre, doivent être également tendus, et la résultante des tensions doit être égale au poids du corps que la poulie supporte. Dans le cas de la *fig. 61*, la force de traction sera donc la même que ce poids. Dans le cas de la *fig. 62*, on prolongera les deux cordons jusqu'à leur rencontre en A ; on mènera par ce point une verticale sur laquelle on prendra une longueur AD représentant le poids que la poulie est chargée ; enfin on mènera DB, DC parallèles aux cordons : les lignes AB, AC ainsi obtenues représenteront les tensions des deux cordons, et la force de traction sera égale à la somme d'elles. Les tensions des cordons étant égales, il en résulte que les lignes AB, AC devront avoir la même longueur, et par conséquent les deux cordons devront être également inclinés sur la verticale.

§ 54. **Moufles.** — Les moufles sont des machines formées de la réunion de plusieurs poulies sur une même chape. La *fig. 63* représente un système de moufles dont chacune est formée de deux poulies tournant autour d'un même axe : chaque poulie tourne d'ailleurs indépendamment des autres. La chape de la moufle inférieure est fixée à l'aide du crochet qui la termine. Une corde est attachée par une de ses extrémités à cette chape ; de là elle descend et passe dans la gorge d'une des poulies inférieures ; puis elle remonte, et passe dans la gorge d'une des poulies supérieures ; puis elle redescend ensuite, pour passer dans la gorge d'une seconde

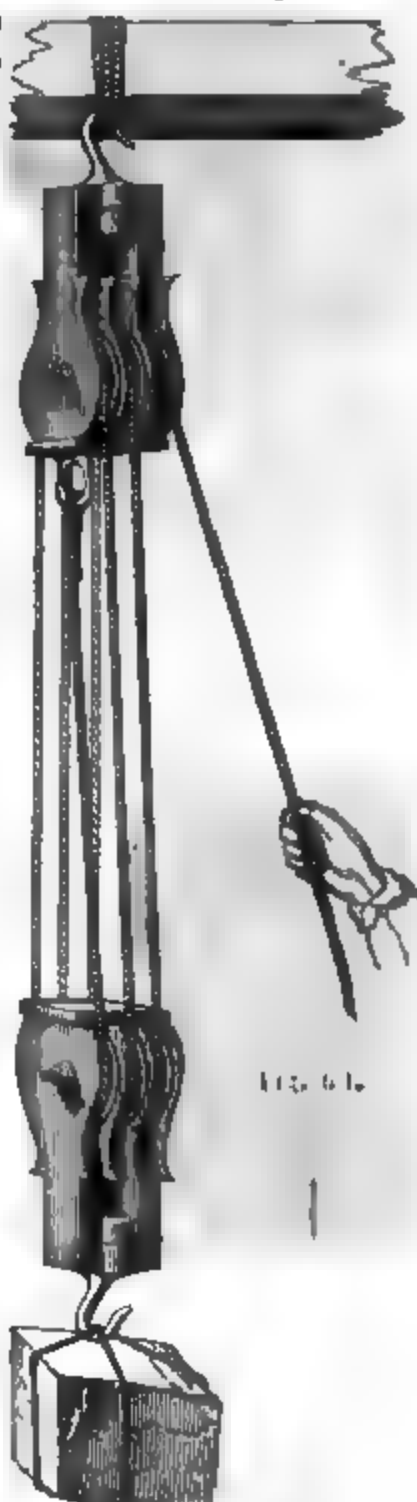
ainsi de suite, jusqu'à ce que, ayant embrassé les diverses poulies, elle se détache de la dernière poulie sur la seconde extrémité de laquelle on applique une force destinée à mettre en équilibre le poids que l'on suspend au moufle inférieure.

La corde dans toute sa longueur aura partout la même tension, puisque les cordons qui unissent une poulie à la suivante sont toujours tendus. D'ailleurs si l'on regarde comme appartenant à la moufle inférieure la partie du poids qui est suspendu à cette moufle, la tension qui est appliquée à l'autre bout de la corde, et qui est la même tension, aura donc la même valeur, c'est-à-dire qu'elle sera égale au poids auquel on veut résister.

On peut donc, comme à l'aide du levier, avec une force donnée vaincre une résistance qu'on voudra. Il suffira de varier dans chaque moufle le nombre de poulies : plus il y en aura, plus on aura la grandeur de vaincre une résistance donnée, car on divise cette résistance par le nombre total des poulies employées.

Le Treuil. — Lorsqu'on veut soulever un corps pesant à une certaine hauteur, on se sert souvent d'un appareil désigné sous le nom de treuil.

Il consiste en un cylindre, quelquefois de fonte, quelquefois de bois, qui est terminé à ses deux extrémités par deux tourillons B, reposant dans des coussinets fixes C.



Le cylindre, qui n'est appuyé que par ses tourillons, peut tourner autour de son axe. Une corde, dont un bout est fixé sur le contour

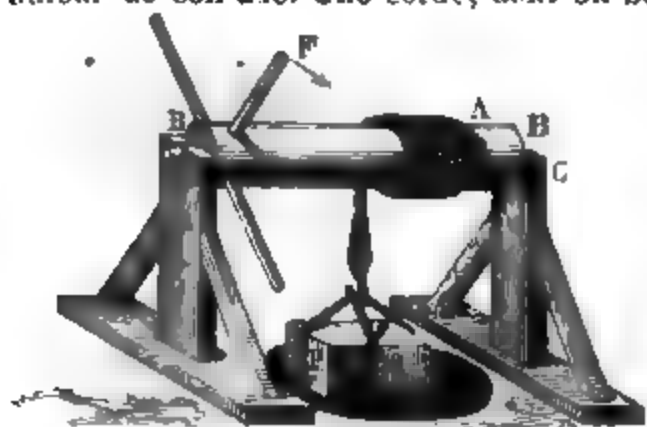


Fig. 64.

tour du cylindre, est attachée par son autre bout au corps P , qu'il s'agit d'élever. On fait tourner le cylindre, en agissant aux extrémités de leviers qui lui sont fixés ou bien qu'on introduit successivement dans des trous pratiques sur son contour; la corde s'enroule, et elle fait

monter le corps auquel elle est attachée.

Pour trouver la relation qui existe entre le poids du corps qui monte et la force qui le fait monter, nous observerons qu'il importe peu que le levier sur lequel agit la force soit implanté en tel point ou en tel autre point de la surface du tour; pourvu que ce levier conserve la même longueur, et que la force lui soit appliquée au même point, et perpendiculairement à sa longueur, cette force devra



Fig. 65.

toujours avoir la même intensité pour soulever le poids. Nous pourrions donc admettre, pour simplifier, que la corde qui supporte le poids, et le levier sur lequel agit la force, soient situés dans un même plan perpendiculaire à l'axe du tour. Dès lors les deux forces P et F , fig. 65, se trouvent évidemment dans les mêmes conditions que si elles étaient appliquées aux deux extrémités du levier courbé MON ; c'est-à-dire que, pour qu'il y ait équilibre, elles doivent être dans le rapport inverse du rayon OM du tour, et de la longueur ON du levier. Si, par exemple, ON est égal à cinq fois OM , la force F devra être la cin-

quième partie du poids P .

§ 56. **Cabestan.** — Le cabestan est un tour, dont l'axe est placé verticalement, fig. 66, et qui est employé, surtout dans les ports de mer, pour exercer de très grands efforts dans une direction horizontale ou presque horizontale. Le tourillon supérieur se prolonge au-dessus du coussinet dans lequel il tourne, et c'est à ce prolongement que sont adaptés quatre, six, ou même huit leviers, disposés réguli-

rement sur son contour. La charpente qui porte les deux coussinets, et qui est simplement posée sur le sol, doit rester immobile pendant la manœuvre du cabestan : à cet effet elle est reliée par des cordes à des piquets solidement enfoncés en terre. Comme le tour est ordinairement très peu élevé, et que le câble sur lequel on doit exercer une force de traction est souvent très long, il serait difficile d'opérer, comme on l'a dit

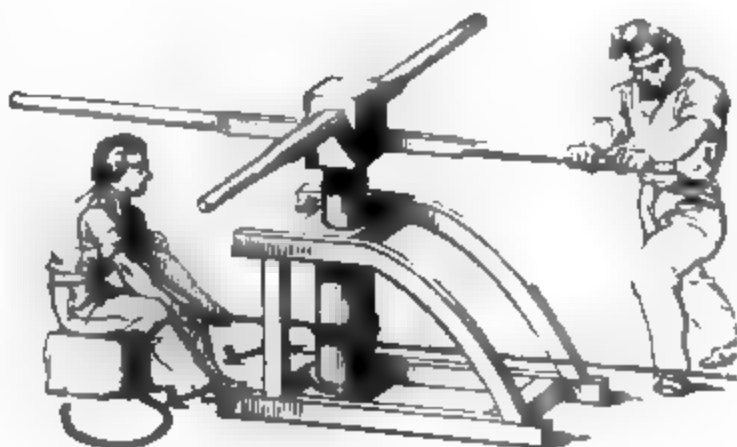


Fig. 66.

dans le paragraphe précédent, en enroulant le câble de plus en plus sur la surface du tour : aussi agit-on autrement. On fait faire au câble deux ou trois fois le tour du cylindre, puis on en remet l'extrémité libre entre les mains d'un homme, fig. 66, qui la tire avec une force suffisante pour empêcher le câble de glisser. De cette manière, lorsqu'un homme agit sur les extrémités des leviers, pour faire tourner le cabestan, le câble est entraîné par simple adhérence, et tandis qu'il s'enroule d'un côté, il se déroule de l'autre : il n'y a donc jamais que la même quantité de câble qui soit enroulée. Pour faciliter l'adhérence du câble sur la surface du tour, et présenter un plus grand obstacle à ce qu'il puisse glisser, on pratique souvent des cannelures longitudinales sur cette surface.

Quant à la relation qui existe entre la résistance vaincue et la force appliquée à l'extrémité d'un des leviers, pour vaincre cette résistance, on la trouvera de même que lorsqu'il s'agissait d'un tour à axe horizontal. On observera seulement que la force de traction exercée par l'homme qui tient la partie du câble qui se déroule fait équilibre à une portion égale de la résistance totale à vaincre, l'excrétant de cette résistance sera mis en équilibre par une force 8, 10 ou 12 fois plus petite, agissant à l'extrémité d'un des leviers, si ce levier est 8, 10 ou 12 fois plus long que le rayon du tour. Si, au lieu d'un seul homme agissant sur un des leviers, il y en a plusieurs qui poussent autant de leviers, ils n'auront à eux tous à exercer que la même pression totale, c'est-à-dire que la somme des forces qu'ils appliqueront aux différents leviers sera égale à la force que devrait appliquer un seul homme pour vaincre la même résistance.

§ 57. **Roue à chevilles.** — Pour extraire des pierres de carrières souterraines qui communiquent par des puits verticaux avec la surface du sol, on emploie fréquemment des treuils, sur lesquels on



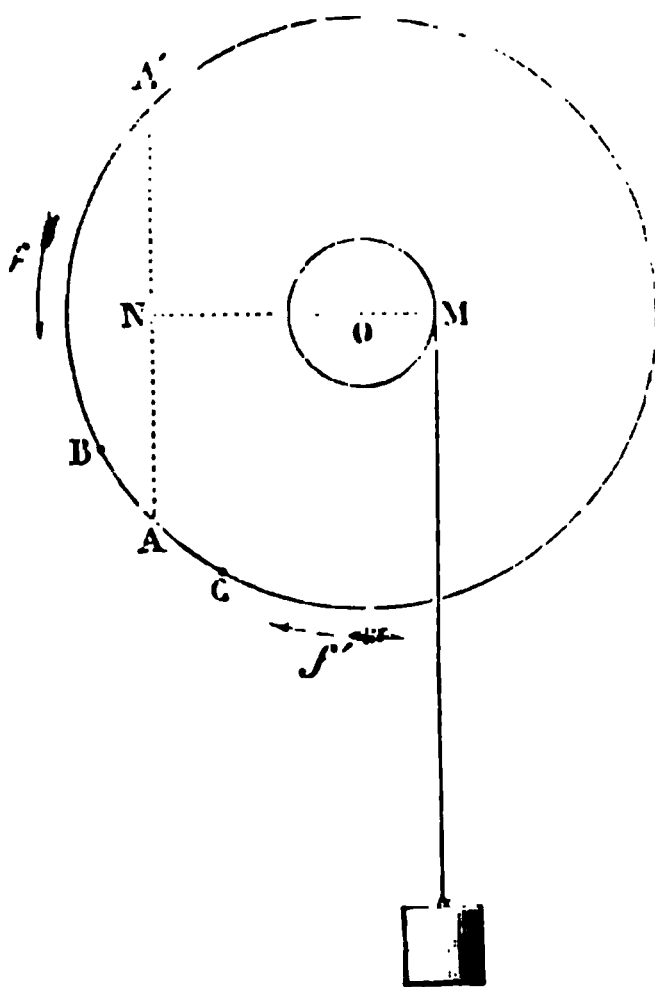
Fig. 67.

agit à l'aide de grandes roues à chevilles, au lieu de leviers, fig. 67. On voit un grand nombre de ces roues aux environs de Paris. Pour manœuvrer cette machine, plusieurs ouvriers montent sur

les chevilles, comme sur une échelle ; le poids de leur corps force la roue à tourner ; la pierre monte, et lorsqu'elle est arrivée au-dessus de l'orifice du puits, un ouvrier recouvre cet orifice de forts matriers sur lesquels on la laisse redescendre.

Entrons dans quelques détails sur l'action des forces dans cette machine. Lorsqu'un homme exerce une pression ou une traction pour vaincre une résistance, il développe une force plus ou moins grande, suivant la grandeur de cette résistance. Ici il n'en est pas de même : la force provenant de l'action d'un homme sur la roue est le poids de son corps, et il n'est pas libre de faire varier cette force à volonté : mais il peut faire varier le bras de levier sur lequel elle agit, et c'est ainsi qu'il parvient à faire équilibre au poids qu'il veut soulever. Admettons, pour simplifier, qu'un seul ouvrier monte sur les chevilles de la roue, et que son poids suffise pour élever la pierre suspendue au câble. On voit que, lorsque l'ouvrier est au point A,

fig. 68, son poids doit être regardé comme agissant sur le bras de levier ON ; en sorte que ce bras de levier augmente, si l'ouvrier s'élève de A en B. On conçoit donc qu'il puisse se placer sur la roue, de manière à faire équilibre au poids de la pierre : il faudra pour cela que son poids et le poids de la pierre soient inversement proportionnels aux bras de levier ON et OM. Soit A la position que doit occuper l'ouvrier, pour que l'équilibre ait lieu. S'il monte en B, le bras de levier sur lequel il agit augmente ; son poids, qui n'a pas diminué, se trouve trop fort pour faire encore équilibre à la résistance : une portion seulement de son poids est employée à produire cet équilibre, et l'autre portion détermine le mouvement de la roue dans le sens de la flèche *f*. L'ouvrier se trouve donc ramené en A ; s'il continue à monter, la roue ne cessera pas de tourner, et la pierre sera ainsi élevée jusqu'au-dessus du puits.



Si l'ouvrier, au lieu de monter, descendait de A en C, le bras du

levier sur lequel il agirait diminuerait de longueur, son poids ne serait plus assez fort pour faire équilibre à la pierre, et la roue prendrait un mouvement contraire, dans le sens de la flèche f' , ce qui le ramènerait encore en A. On voit donc que le point A est une position d'équilibre stable pour l'ouvrier, puisque s'il s'en éloigne, soit en montant, soit en descendant, la roue prend toujours un mouvement en vertu duquel il est ramené en ce point A.

Si l'ouvrier se place en A', son poids fera aussi bien équilibre au poids de la pierre que lorsqu'il est en A, puisque son bras de levier sera la même ligne ON. Mais l'équilibre sera instable : que l'ouvrier monte ou descende sur la roue, à partir du point A', la roue prendra un mouvement qui l'en éloignera de plus en plus. La stabilité de l'équilibre qui a lieu, lorsque l'ouvrier est au point A, est d'une très grande importance, en ce qu'elle prévient les accidents graves qui se produiraient si la roue était entraînée par le poids de la pierre, et emportait l'ouvrier dans son mouvement ; aussi, pour conserver les avantages de cette stabilité, doit-on faire en sorte que le point A soit notablement plus bas que l'axe du treuil, car elle pourrait devenir inefficace, si ce point n'était que très peu inférieur à l'axe.

§ 58. **Courroie sans fin.** — Lorsqu'on veut transmettre le mouvement de rotation d'un arbre à un autre arbre parallèle au premier, et qui n'en est pas très rapproché, on emploie souvent une courroie sans fin, qui embrasse deux tambours, dont chacun est fixé à un des arbres. Ce mode de transmission de mouvement est employé surtout dans les ateliers où plusieurs machines, disposées pour effectuer diverses espèces de travaux, reçoivent le mouvement d'une même machine motrice, d'une roue hydraulique par exemple, ou d'une machine à vapeur. La machine motrice fait tourner un ou plusieurs arbres qui s'étendent dans toute la longueur des ateliers : et c'est sur ces arbres que sont placées, de distance en distance, les courroies qui doivent faire mouvoir les diverses machines-outils destinées, soit à travailler les métaux, soit à préparer et filer le coton, soit à scier le bois, etc. La *fig. 69* montre une transmission de ce genre : la courroie, entraînée par le mouvement de rotation de l'arbre AB, fait tourner une meule à aiguiser. Si l'on veut arrêter le mouvement de la meule, il suffit de pousser vers la gauche l'extrémité C du levier CDE, mobile autour du point D : la fourchette qui termine le levier en E, et dans laquelle passe la courroie, est alors portée vers la droite ; et la courroie, entraînée latéralement par cette fourchette, vient s'enrouler sur un second tambour placé à côté de celui sur lequel elle était appliquée. Ce second

on désigne souvent sous le nom de *poulie folle*, n'est
arbre qui le traverse, et peut, au contraire, tourner

ret
ur-
ont
ans
ar-
ou-
la
ste.
ou-
la
ve-
ora
ers
ré-
rier
ur-
era
tait
sh-
e a

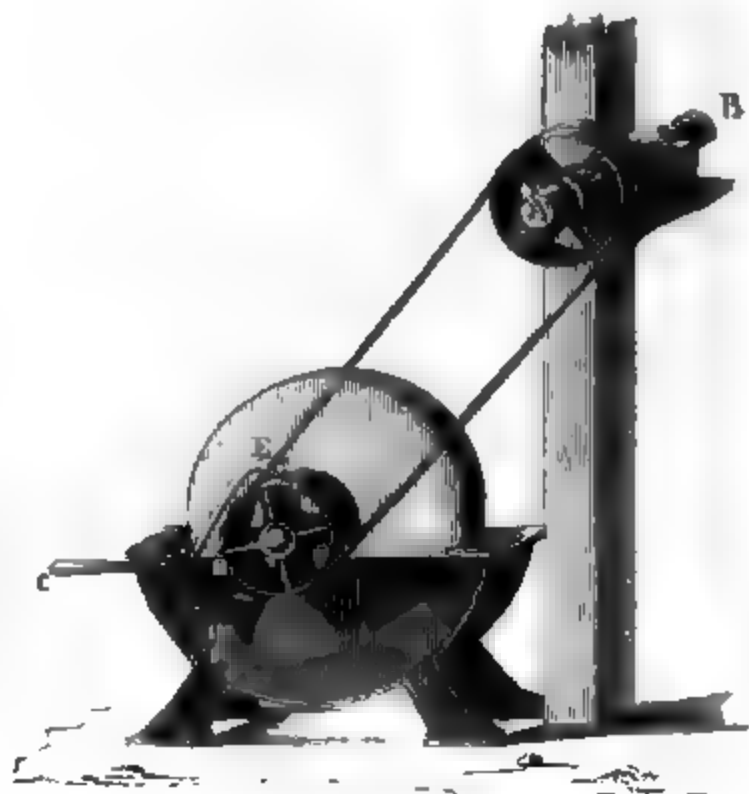


Fig. 69.

ous
e de la manière dont les forces agissent, par l'intermé-
rroies sans fin, nous imaginerons qu'on veuille faire

oids P,
ié à une
enroule
A Pour
sur la
qui fait
ambour
ivement
se com-
treuil,
ie MN.
loit être
toute sa

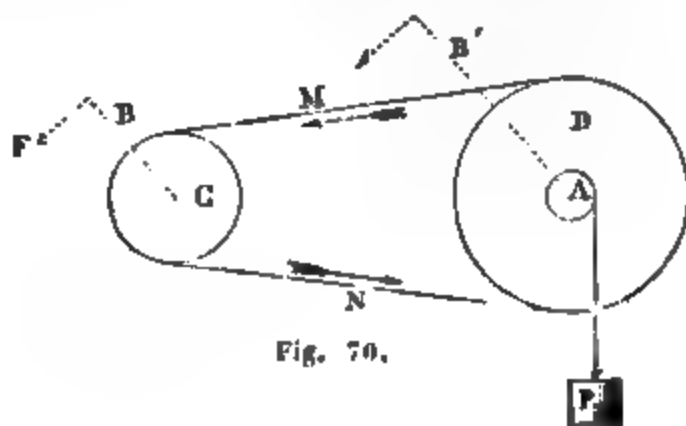


Fig. 70.

n qu'il se produise, entre sa face intérieure et les sur-
bours, une *adhérence* qui l'empêche de glisser sur ces
is la tension n est pas la même partout. Pour que le

poids P soit soulevé, il faut que le brin M , qu'on nomme le brin moteur, soit plus tendu que le brin N : l'excès de la première tension sur la seconde est une force qui agit tangentiellement au tambour D , et qui fait équilibre au poids P . D'une autre part, ce même excès de tension est une résistance, appliquée tangentiellement au tambour C , et qui doit être vaincue par la force F , appliquée à la manivelle. Si le bras de la manivelle est double du rayon du tambour C , la différence des tensions des brins M et N sera double de la force F : cette différence de tensions, agissant sur le tambour D , produira donc le même effet qu'une force égale à F agissant sur une manivelle B' , dont le bras serait double du rayon du tambour D . Ainsi, que la force F agisse sur la manivelle B , pour faire tourner le treuil par l'intermédiaire de la courroie, ou bien qu'elle agisse sur la manivelle B' , de manière à le faire tourner directement, elle sera capable de vaincre exactement le même poids P .

Remarquons maintenant que les longueurs des bras des manivelles B et B' sont dans le même rapport que les rayons des tambours C et D , et nous verrons que l'emploi de la courroie sans fin, comme intermédiaire, produit le même effet, pour l'action de la force F , qu'une augmentation du bras de levier de cette force, dans le rapport des rayons des tambours C et D . En sorte que, si le rayon du tambour D est double, triple, quadruple, etc., du rayon du tambour C , la force F sera capable de soulever un poids P double, triple, quadruple, etc., de celui qu'elle soulèverait, si elle agissait sur la même manivelle B , appliquée directement au treuil. Il n'est pas nécessaire d'ajouter que, si le rayon du tambour D était plus petit que celui de l'autre tambour, la force F serait équilibre à un poids plus faible que si elle agissait directement sur le treuil, à l'aide de la même manivelle.

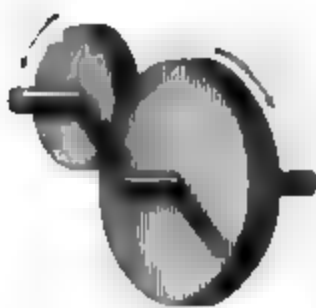


Fig. 71.

§ 59. **Roues dentées, ou Engrenages.** — Les roues dentées sont destinées, comme les courroies sans fin, à transmettre le mouvement de rotation d'un arbre à un autre; on les emploie dans le cas où les deux arbres, étant parallèles, sont suffisamment rapprochés l'un de l'autre, et aussi lorsque les arbres ne sont pas parallèles.

Pour communiquer le mouvement d'un arbre tournant à un autre arbre qui lui est parallèle, et qui en est très voisin, on pourrait se

contenter d'adapter à ces deux arbres deux tambours dont les surfaces se touchent, fig. 71. Si ces deux tambours étaient suffisamment serrés l'un contre l'autre, il se produirait, entre leurs surfaces,

adhérence en vertu de laquelle l'un des deux tambours ne pourra pas tourner sans entraîner l'autre. Les deux mouvements seront de sens contraire, comme le montrent les flèches placées sur *q. 71*. Mais dès que l'arbre auquel le mouvement doit être transmis aurait à vaincre une résistance un peu grande, l'adhérence serait plus suffisante pour le faire tourner, et un seul des deux tambours tournerait, en glissant sur l'autre.

Imaginons maintenant que, pour suppléer à l'adhérence, et faire sorte que l'un des deux tambours ne puisse pas tourner sans entraîner l'autre, on ait disposé sur leurs contours des saillies et des creux qui *engrènent* les uns dans les autres, et l'on aura ce que nous nomme des *roues dentées*, ou bien un *engrenage*. Le mouvement se transmettra exactement de la même manière que précédemment : mais l'une des deux roues ne pourra pas tourner, sans entraîner l'autre, à moins toutefois que les saillies ou *dents* ne viennent à se briser.

Les dents d'une roue dentée sont toutes pareilles, et disposées régulièrement sur tout le contour de cette roue. Lorsque deux roues vont engrener l'une avec l'autre, une dent et le creux qui la sépare de la dent voisine occupent le même espace sur les circonférences de ces deux roues : en sorte que les nombres des dents sont entre eux dans le même rapport que les longueurs de ces circonférences, et aussi dans le même rapport que leurs rayons. Une roue est petite par rapport à la roue avec laquelle elle doit engrener, et souvent le nom de *pignon*.

Sous le rapport de l'action des forces, les roues dentées se comportent de la même manière que les tambours sur lesquels passe une corde sans fin.

Supposons que la force *F*, *fig. 72*, soit appliquée à la manivelle *B*, pour faire tourner le vilebriquet *A*, par l'intermédiaire des roues dentées *C* et *D*, et faire lever ainsi le poids *P*. Les dents de la roue *C* exerceront sur les dents de la roue *D* une pression *t*, qui fera équilibre au poids *P*; mais les dents de la roue *D* réagiront sur les premières, et leur feront supporter une pres-

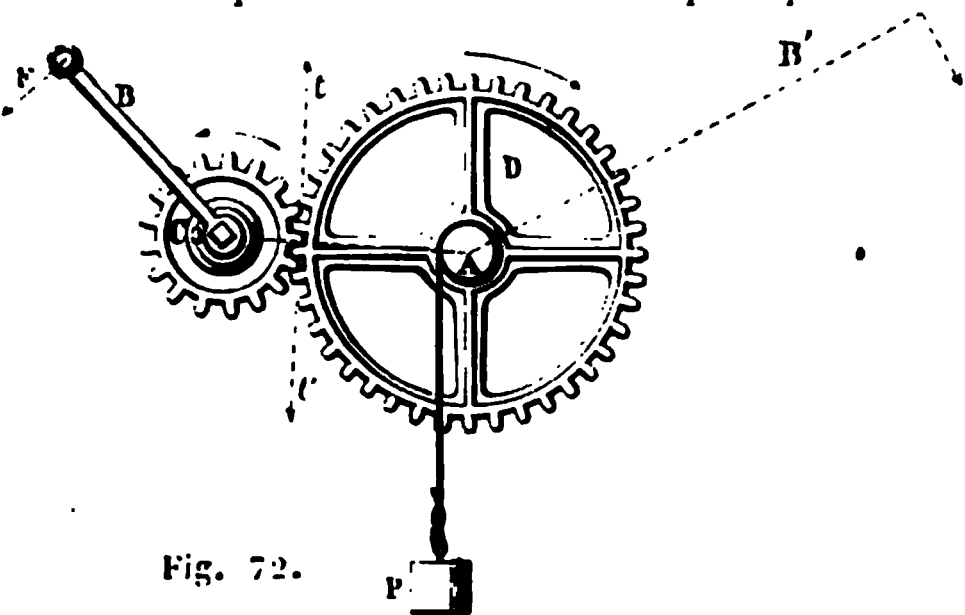


Fig. 72.

sion égale et contraire t' , qui devra être vaincue par la force F . Le rayon de la roue C est le tiers du bras de la manivelle B . La force t' sera le triple de F ; la force t sera donc aussi triple de F ; elle pourra être remplacée, pour vaincre le poids P , par une force F , et agissant sur une manivelle B' dont le bras soit le tiers du rayon de la roue D . Ainsi la force F , appliquée à la manivelle B' et faisant monter le poids P par l'intermédiaire des roues C et D , doit avoir la même valeur que si elle était appliquée à la manivelle B , fixée directement au treuil A . Remarquons en outre que le rapport des longueurs des manivelles B et B' est le même que le rapport des rayons des roues C et D , et par conséquent aussi que le rapport des nombres de dents que portent ces roues. Concluons que, si la roue D a deux, trois, quatre fois plus de dents que la roue C , la force F pourra soulever un poids double, triple, quadruple de celui qu'elle soulèverait, si elle agissait sur la manivelle B , fixée directement au treuil.

La transmission du mouvement de rotation d'un arbre à un autre arbre qui fait un angle avec le premier, s'effectue d'une manière tout à fait analogue, à l'aide de roues dentées appelées *roues d'angle*. La fig. 73 représente deux roues de cette espèce servant à communiquer l'un avec l'autre deux arbres qui sont en angle droit. Sous le rapport de la transmission des forces, on observe que tout ce qui a été dit pour les roues dentées



Fig. 73.

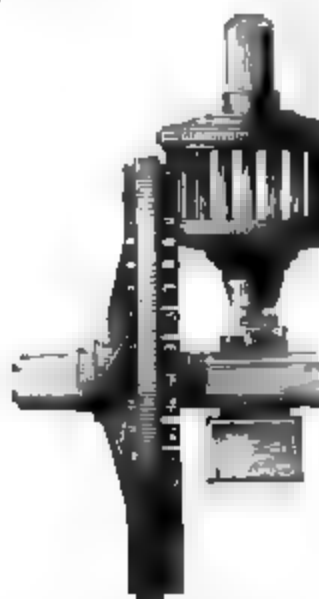


Fig. 74.

représentées par la fig. 73, est applicable aux roues d'angle, soit à y changer un seul mot.

La fig. 74 représente un engrenage d'une autre espèce

seulement à communiquer le mouvement de rotation d'un arbre à un autre arbre qui lui est perpendiculaire. La forme particulière de la plus petite des deux roues lui a fait donner le nom de *lanterne*.

Souvent une roue dentée engreène avec une barre garnie de dents, fig. 75, en sorte que, lorsque la roue tourne, la barre marche dans le sens de sa longueur. Une pareille barre dentée se nomme une *crémaillère*. La résistance qui est appliquée à la crémaillère, et qui tend à s'opposer à son mouvement, se transmet intégralement aux dents de la roue, cette résistance, et la force qui agit sur une manivelle, pour faire tourner la roue, doivent donc être entre elles dans le rapport inverse du rayon de la roue et du bras de la manivelle.

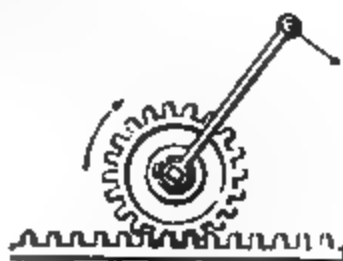


Fig. 75.

§ 60. *Cric.* — Comme exemple de l'emploi des roues dentées, pour exercer des efforts considérables, nous prendrons le *cric*, fig. 76, qui sert à soulever d'une petite quantité des corps très pesants.

Une crémaillère A engreène avec un pignon C; sur l'axe de ce pignon est fixée une roue dentée B, qui tourne en même temps que lui, et qui engreène avec le second pignon D; enfin l'axe de ce second pignon est muni d'une manivelle E. On introduit l'extrémité de la crémaillère au-dessous du corps qu'on veut soulever, puis on fait tourner la manivelle dans le sens indiqué par la flèche; le pignon suit la manivelle, et fait tourner la roue B; le pignon C est entraîné par cette roue, et fait monter la crémaillère, qui produit ainsi l'effet qu'on voulait obtenir.



Fig. 76.

Évaluons la force qui doit être appliquée à la manivelle, pour faire équilibre à la résistance que doit exercer la crémaillère. Nous supposons, pour cela, que le bras de la manivelle soit égal à 5 fois le rayon du pignon C, que le pignon D porte 6 dents, et que la roue B en porte 18. Si la manivelle agissait directement sur le pignon C, la force qui lui serait appliquée, ayant un bras de levier plus grand que celui de la résistance, ne serait que la cinquième partie de cette résistance. Mais l'action de la manivelle sur le pignon C a lieu par l'intermédiaire d'un engrenage, dans lequel la roue B a 3 fois plus de dents que le pignon D : la force appliquée à la manivelle devra donc être 3 fois plus petite qu'elle n'aurait

été sans cela, c'est-à-dire qu'elle ne sera, en définitive, que la quinzième partie de la résistance que doit vaincre la crémaillère. Avec un pareil cric, une force de 40 kilogrammes suffirait pour soulever un poids de 600 kilogrammes.

Le corps du cric est un morceau de bois dans lequel on a pratiqué une entaille destinée à loger les roues dentées. Ces roues sont recouvertes par une plaque de tôle, traversée par l'axe de la manivelle, et qu'on a supposée enlevée dans la *fig. 76*, afin de laisser voir le mécanisme. Un encliquetage, disposé sur la face extérieure de cette plaque, *fig. 77*, permet d'arrêter l'action de la force qui fait

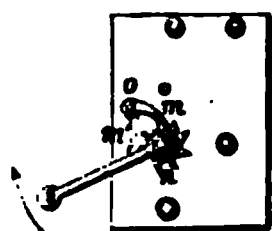


Fig. 77.

tourner la manivelle, sans que pour cela la crémaillère cède sous l'effort du poids qu'elle supporte, rentre à l'intérieur du cric, en faisant tourner les roues en sens contraire. Un doigt *m*, mobile autour du point *o*, vient s'engager entre les dents d'une roue *n*, qui fait corps avec la manivelle. D'après la forme des dents et la disposition du doigt, on voit que la manivelle peut tourner que dans un sens, celui indiqué par la flèche. Pendant qu'elle tourne, le doigt est successivement soulevé par les diverses dents de la roue, puis il retombe successivement, en vertu de son poids, chaque fois qu'une dent a passé. Lorsqu'on veut faire rentrer la crémaillère dans le cric, on n'a qu'à soulever le doigt en le faisant tourner autour du point *o*, pour l'amener dans la position *m'* : alors il ne touche plus les dents que par sa partie convexe, et la manivelle se retrouve dans les mêmes conditions que si l'encliquetage n'existait pas.

§ 61. **Chèvre.** — Pour élever les matériaux qui servent aux constructions, on emploie la *chèvre*, qui est une combinaison de treuil, de poulie, et quelquefois des roues dentées.

La chèvre la plus simple, *fig. 78*, se compose de deux montants en bois, réunis par un certain nombre de traverses, et servant de support à un treuil *T* et à une poulie *P*. La chèvre est simplement posée sur le sol, ou sur un plancher placé à une certaine hauteur, sur lequel elle s'appuie par les deux extrémités inférieures de ces montants. Pour la maintenir dans la position inclinée qu'on est obligé de lui donner pour la faire fonctionner, on soutient son extrémité *C* à l'aide d'une corde *CD*, qu'on attache, soit à un arbre, soit à une manivelle. Le corps qu'on veut élever est saisi par une autre corde qui passe sur la gorge de la poulie, et vient aboutir au treuil, sur la surface duquel elle est fixée. On fait tourner le treuil à l'aide de leviers qu'on introduit dans des trous disposés pour cela, la corde s'enroule, et le corps monte. La tension de la corde qui se détache du treuil

Égal au poids du corps que cette corde soutient la force à employer, pour élever le corps, est donc exactement la même que si la poulie n'existait pas, et que le corps fût directement suspendu au treuil.

La tension de la corde CD, qui maintient la chèvre dans une position inclinée, peut être déterminée par les considérations suivantes. Si cette corde venait à être supprimée, la chèvre tomberait, en tournant autour de la ligne AB. Le poids du corps qu'on élève, et qui tend à produire ce mouvement de la chèvre, est mis en équilibre par la tension de la corde CD; ces deux forces peuvent donc être regardées comme agissant sur un levier, dont les deux bras seraient les distances de la ligne AB à leurs directions; c'est-à-dire qu'elles doivent être entre elles dans le rapport inverse de ces distances. On voit par là que, plus la chèvre s'approchera d'être verticale, moins la corde CD sera tendue.

Lorsqu'on doit élever des matériaux très-pesants à une grande hauteur, on emploie avec avantage la chèvre représentée par la *fig. 79*. Cette chèvre est souvent désignée sous le nom de *supane*. Elle se compose d'un treuil à engrenages, et d'un mât vertical, terminé en croix à sa partie supérieure. Ce mât s'appuie, par un pivot de fer, dans une crapaudine adaptée au chassis de charpente auquel le treuil est fixé; il est maintenu verticalement par quatre cordes, ou haubans, qu'on attache à des points fixes situés dans le voisinage. Une corde s'attache à l'un des bras de la croix, descend pour passer dans la gorge d'une poulie mobile, à la chape de laquelle est suspendu le corps que l'on veut élever, remonte ensuite pour passer sur trois poulies fixes, et redescend enfin pour s'enrouler sur le treuil. Deux manivelles, placées aux deux extrémités d'un axe horizontal, servent à faire tourner un pignon; ce pignon communique son mouvement à une roue dentée qui est livrée au treuil. La corde s'enroule, et fait ainsi monter le corps. Un encliquetage est adapté à

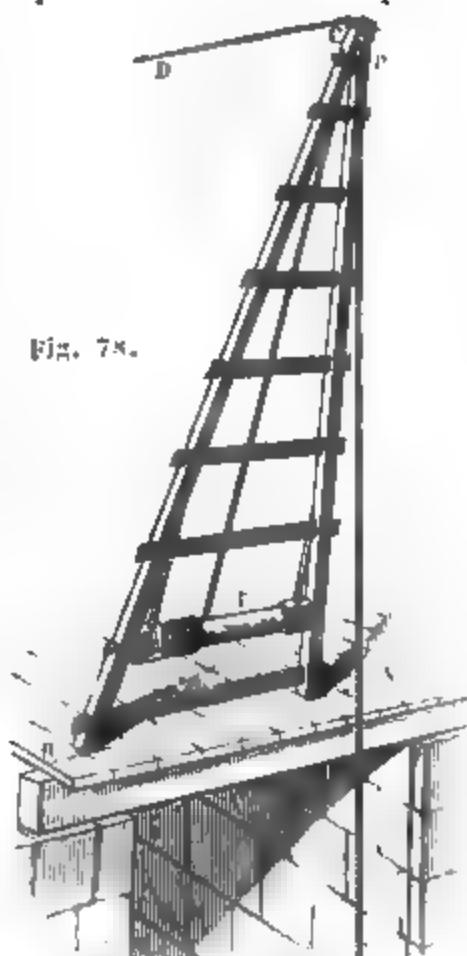
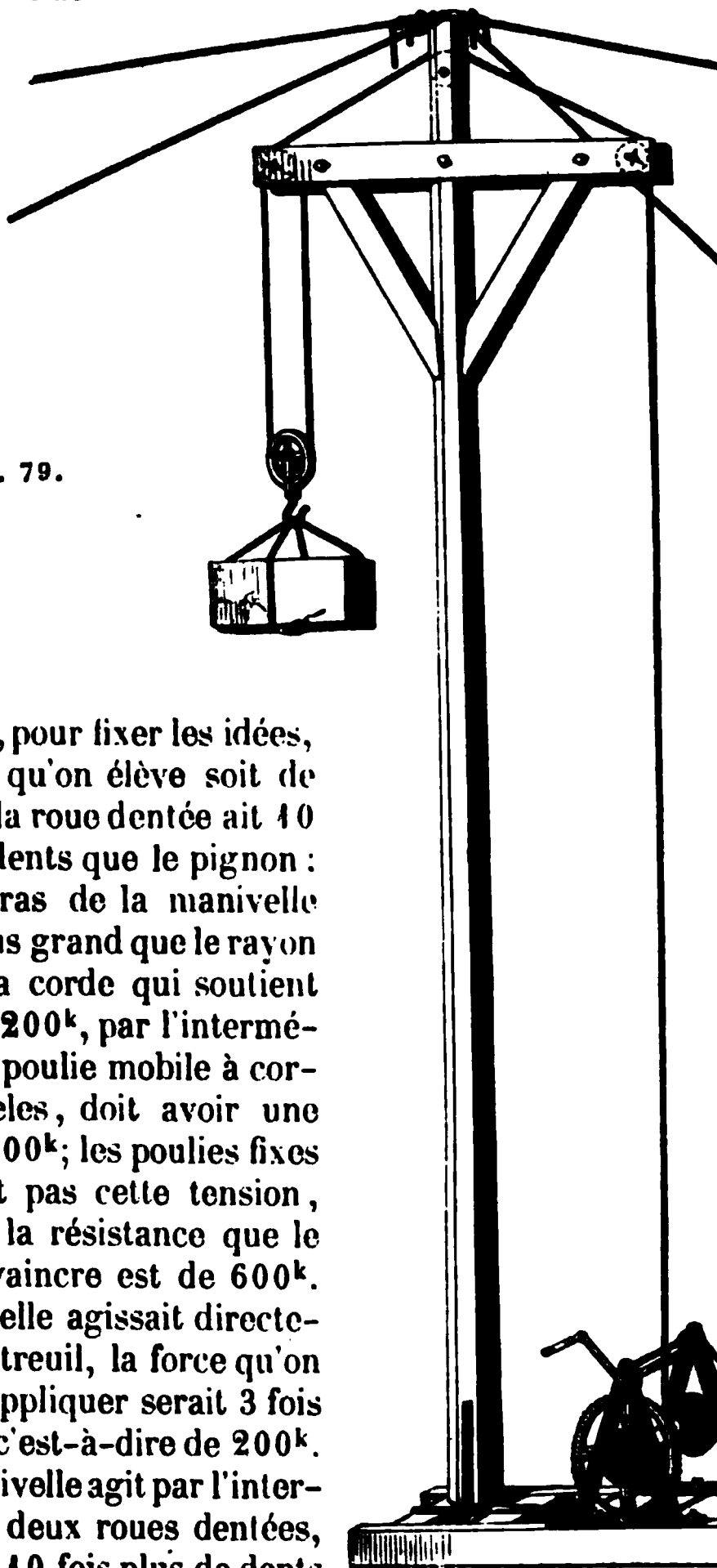


Fig. 78.

l'axe des manivelles, pour empêcher que le corps ne redescende lorsqu'on l'abandonne.

Fig. 79.



Supposons, pour fixer les idées, que le poids qu'on élève soit de 4200^k ; que la roue dentée ait 40 fois plus de dents que le pignon : et que le bras de la manivelle soit 3 fois plus grand que le rayon du treuil. La corde qui soutient le poids de 4200^k , par l'intermédiaire d'une poulie mobile à cordons parallèles, doit avoir une tension de 600^k ; les poulies fixes ne modifiant pas cette tension, on voit que la résistance que le treuil doit vaincre est de 600^k . Si la manivelle agissait directement sur le treuil, la force qu'on devrait lui appliquer serait 3 fois plus petite, c'est-à-dire de 200^k . Mais la manivelle agit par l'intermédiaire de deux roues dentées, dont l'une a 40 fois plus de dents que l'autre; la force qu'on doit lui appliquer est donc *plus petite qu'elle ne serait sans cela*, c'est-à-dire qu'

que de 20^k. Observons enfin que l'axe du pignon porte deux manivelles, une à chaque bout : si deux hommes agissent ensemble sur ces deux manivelles, chacun d'eux n'aura à exercer qu'une pression de 40^k.

On voit aisément que, d'après la disposition de cette chèvre, les tensions des haubans, qui maintiennent la partie supérieure du mât, ne sont jamais très grandes.

§ 62. **Grue.** — La *grue* est destinée, comme la chèvre, à élever des corps très pesants; elle se compose, de même, d'un treuil et d'une ou plusieurs poulies. Une corde s'enroule sur le treuil, s'en détache, passe sur les poulies, puis descend verticalement pour saisir le fardeau à élever; ou bien encore elle passe sous la gorge d'une poulie mobile qui supporte ce fardeau, et vient ensuite, en remontant, s'attacher à un point fixe. Mais en outre, toute la machine peut tourner autour d'un axe vertical; en sorte que, lorsque le fardeau a été élevé à une hauteur convenable, on peut le faire mouvoir horizontalement, en faisant tourner la grue.

La *fig. 80* représente une grue construite récemment par M. Cavé pour le port de Brest. La *fig. 81* montre le mécanisme de cette grue vue par derrière, et à une échelle plus grande. A est le treuil sur lequel s'enroule la corde. B est une roue dentée fixée à l'axe du treuil, et qui tourne en même temps que lui; elle porte 66 dents. Un pignon C engrène avec cette roue; il porte 44 dents. A l'axe de ce pignon est fixée une roue dentée D, de 54 dents, qui est presque complètement cachée dans la *fig. 80*. Un pignon E, de 9 dents, engrène avec la roue D. Enfin une roue dentée F, également de 54 dents, est fixée à l'axe de ce pignon. Les axes des roues D et F sont placés au même niveau, en sorte que le second cache le premier, sur la *fig. 81*. Au-dessous de ces deux roues, on aperçoit un axe GH, qui passe en avant de la partie inférieure de la roue D, et en arrière de la partie inférieure de la roue F : cet axe, muni d'une manivelle à chacune de ses extrémités, porte deux pignons K, L, de chacun 9 dents, qui, dans la position actuelle, n'engrènent avec aucune des deux roues D et F. Si on le fait glisser dans le sens de sa longueur, vers la droite, le pignon K engrènera avec la roue D; si au contraire on fait glisser cet axe vers la gauche, le pignon L engrènera avec la roue F. L'axe GH est maintenu dans chacune de ces trois positions différentes par un levier à contre-poids M, qui peut tourner autour du petit axe N, et dont l'une des extrémités, recourbée en forme de crochet, vient s'engager entre des saillies disposées à cet effet sur l'axe GH. Dans la position actuelle des pignons K, L, si l'on fait tourner les deux manivelles, le mouvement ne se transmettra à au-

cune roue, et le treuil ne tournera pas. Lorsque le pignon K engrènera avec la roue D, les manivelles feront tourner le treuil, par l'intermé-

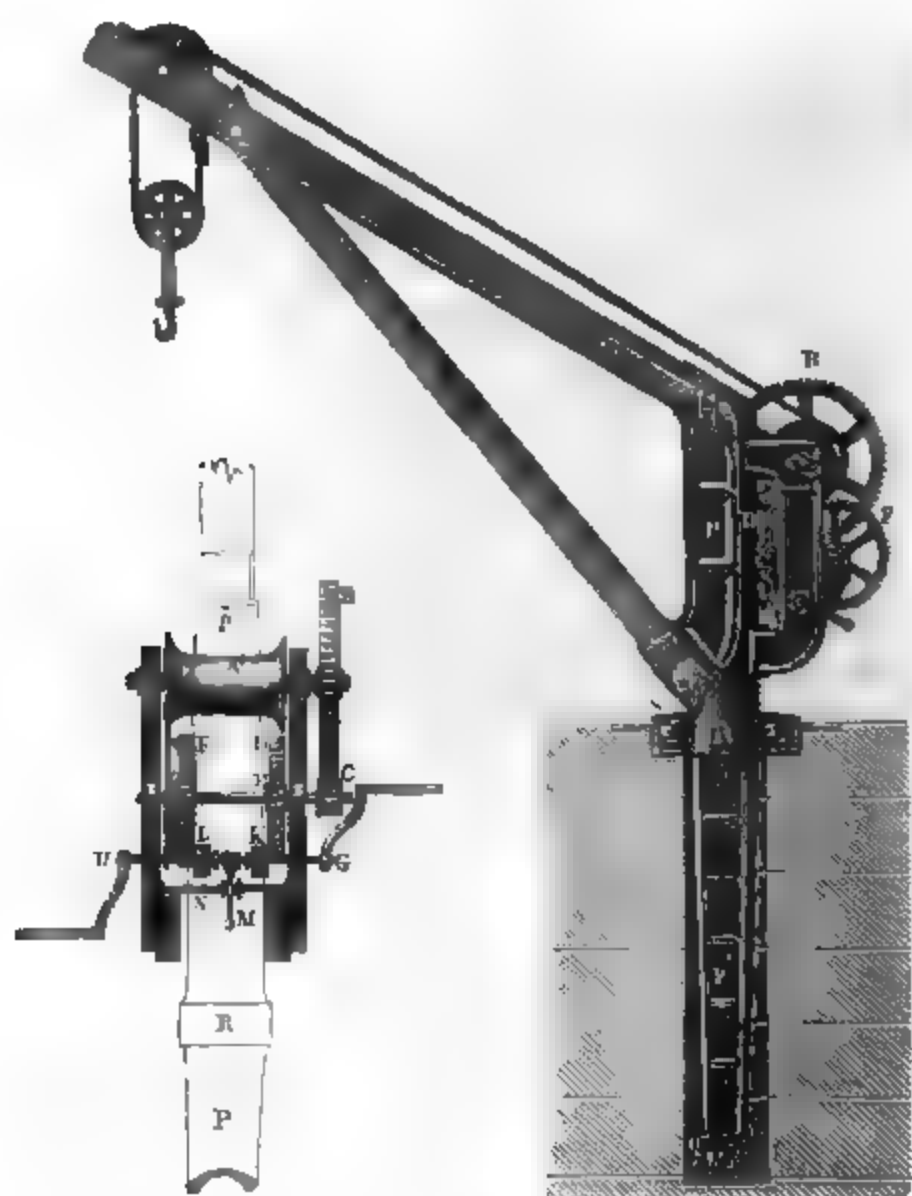


Fig. 81. Fig. 80. (Échelle de 1 centimètre pour mètre.)

diaire des roues B, D, et des pignons C, K; le pignon E et la roue F tourneront, mais sans servir à rien : les choses se passeront comme si ce pignon et cette roue n'existaient pas. Enfin lorsque le pignon L engrènera avec la roue F, les manivelles feront tourner le treuil, par l'intermédiaire des roues B, D, F, et des pignons C, E, L.

Voyons comment on pourra trouver la grandeur de la force qui devra être appliquée à chaque manivelle, pour soulever un fardeau d'un poids connu. Nous admettrons pour cela que le bras de chaque

manivelle, mesuré perpendiculairement à l'axe GH, soit égal à trois fois le rayon du treuil : et nous examinerons d'abord la disposition présente le mécanisme, lorsque le pignon K engrène avec la roue D. Le fardeau étant soutenu par une poulie mobile à cordons parallèles, la tension de la corde est la moitié du poids du fardeau. Une seule des deux manivelles agissait directement sur le treuil, elle devrait être soumise à une force trois fois plus petite que la tension de la corde : cette force serait donc la sixième partie du poids à soulever. Si cette manivelle agissait sur l'axe du pignon C, la force qu'on devrait lui appliquer serait six fois plus petite, c'est-à-dire la trente-sixième partie du poids à soulever, puisque le pignon C a six fois moins de dents que la roue B. Enfin cette manivelle agissant sur GH, et faisant tourner directement la roue D, à l'aide du pignon K, la force qui doit lui être appliquée sera, par une raison analogue, six fois plus petite que la précédente, c'est-à-dire la deux cent soixantième partie du poids du fardeau. Mais l'axe GH est muni de deux manivelles : chacune d'elles devra donc recevoir l'action d'une force 432 fois plus petite que ce poids.

On reconnaîtra sans peine que, dans la seconde disposition, lorsque le pignon L engrènera avec la roue F, la force qu'on devra appliquer à chaque manivelle ne sera que la sixième partie de celle qu'on devait employer dans la première disposition : c'est-à-dire qu'elle devra être 2592 fois plus petite que le poids du fardeau. On voit qu'avec une pareille grue deux hommes pourront soulever un poids énorme. Ils n'auront, par exemple, à exercer sur les manivelles que des pressions d'environ 10^4 pour enlever une locomotive dont le poids est à peu près de 25000^k .

La pièce de fonte PP sert d'axe à toute la machine. Elle se termine inférieurement par un pivot Q, qui pénètre dans une crapaudine : et à l'endroit où elle sort du massif de maçonnerie qui doit la maintenir verticalement, elle présente un renflement cylindrique R, à l'aide duquel elle s'appuie contre cette maçonnerie. Des galets S, S, sur lesquels nous reviendrons plus tard, sont disposés tout autour de cette partie R, afin de diminuer autant que possible les frottements qui se développent, lorsqu'on fait tourner la grue autour de son axe.

Lorsqu'un fardeau très pesant est suspendu à la poulie mobile qui termine la grue, tout l'appareil tend à être renversé, et le sera nécessairement, si le massif de maçonnerie n'opposait pas une résistance suffisamment grande. Afin de nous faire une idée de la grandeur de cette résistance, nous allons voir comment on peut trouver la pression que la pièce PP exerce sur ce massif, par sa part

ou, ce qui revient au même, nous déterminerons la pression, égale et contraire, que le massif exerce sur cette partie de la grue. Si la ma-

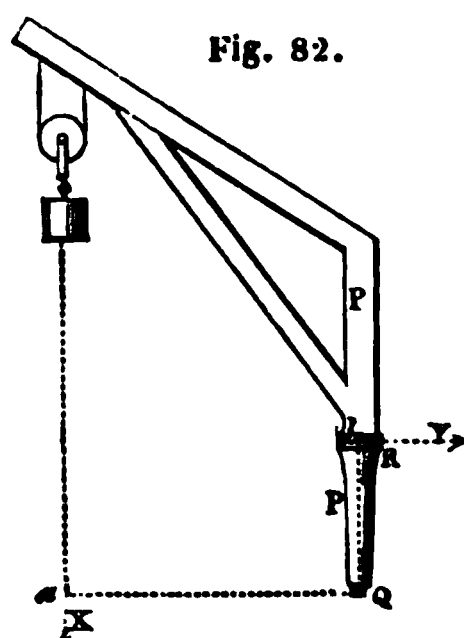


Fig. 82.

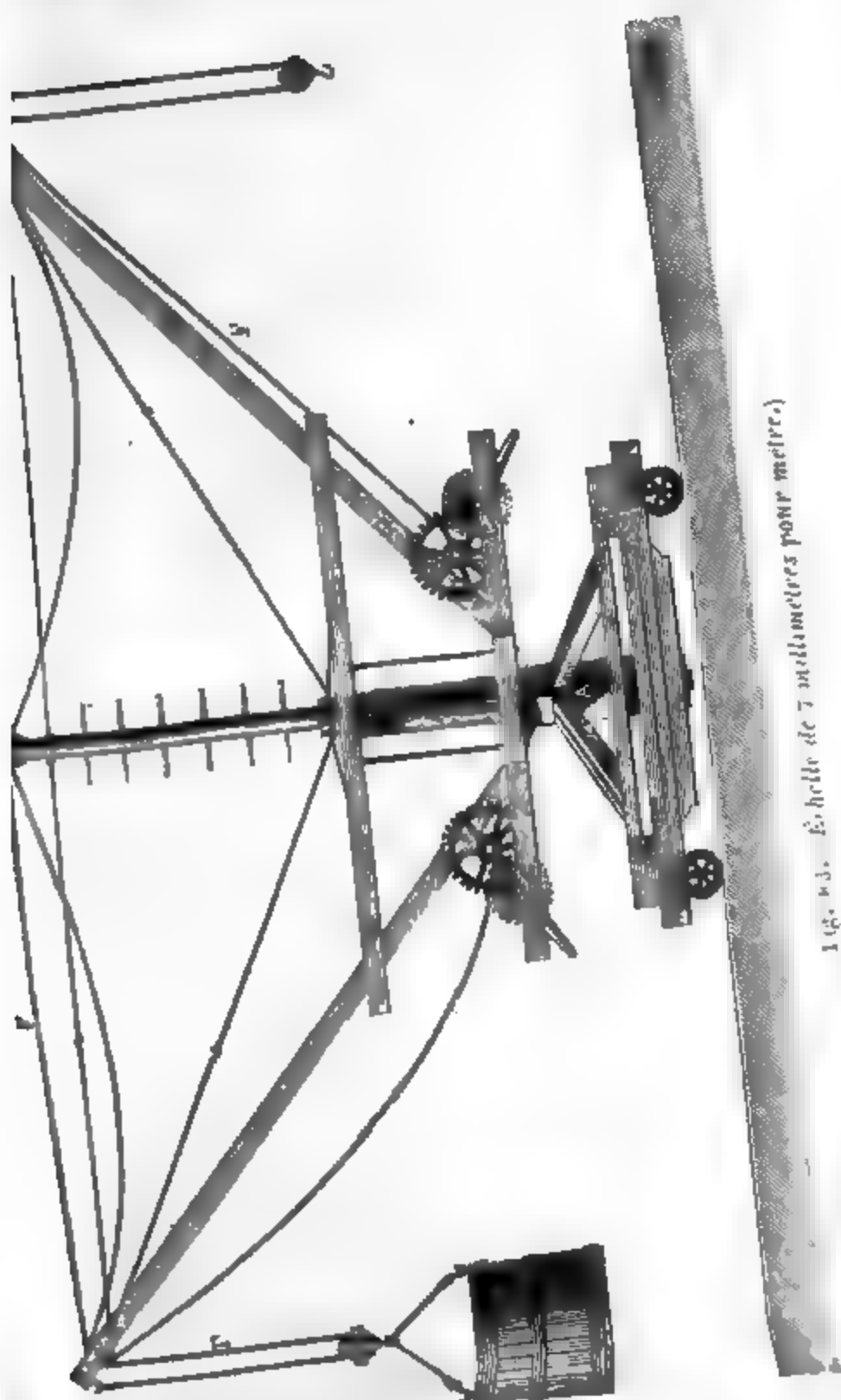
çonnerie n'était pas suffisamment solide, la grue céderait à l'action du poids X du fardeau, *fig. 82*, et tomberait en tournant autour de son extrémité inférieure Q ; la pression Y qu'elle supporte en R l'empêche de prendre ce mouvement : les deux forces X et Y se trouvent donc dans les mêmes conditions que si elles agissaient sur le levier coudé aQb . Ainsi le rapport de la pression Y , au poids X du fardeau, est le même que le rapport de Qa à Qb . Si Qa est égal à une fois et demie Qb , la pression Y sera égale à une fois et demie le poids du

fardeau.

Les grues sont employées surtout pour décharger les bateaux. La machine est d'abord amenée dans une position telle que la poulie mobile qui la termine soit placée directement au-dessus du bateau ; après avoir fait descendre cette poulie, ce qui oblige la corde enroulée sur le treuil à se dérouler, on attache le fardeau qu'on veut enlever au crochet par lequel sa chape se termine ; puis on fait tourner le treuil, la corde s'enroule de nouveau, et le fardeau s'élève. Lorsque ce fardeau se trouve ainsi amené à une hauteur suffisante, on fait tourner la grue autour de son axe vertical, jusqu'à ce qu'il soit suspendu au-dessus de l'endroit où l'on veut le déposer : enfin on laisse aller le treuil au mouvement que tend à lui imprimer la tension de la corde, le fardeau descend, et dès qu'il est convenablement appuyé, soit sur le sol, soit sur la voiture qui doit servir à le transporter, on le décroche, pour opérer de même sur un autre fardeau.

Les grues sont encore employées fréquemment dans les ateliers où l'on a à remuer des corps très lourds, notamment dans les établissements de construction de machines, et dans les fonderies. Plusieurs grues sont disposées à cet effet dans l'atelier, et on les fait fonctionner successivement, lorsqu'on veut transporter une pièce pesante : une première grue saisit cette pièce, et l'amène dans le voisinage d'une seconde, qui la saisit à son tour, pour la transporter plus loin, et ainsi de suite, jusqu'à ce que la pièce se trouve à l'endroit où l'on voulait l'amener. On se sert également de grues pour transporter du foyer à l'enclume les grosses pièces de fer qu'on veut forger, et pour les maintenir sur l'enclume, pendant que les *maroteaux* fonctionnent.

GRUE.



1 c. m. 3. Échelle de 7 millimètres pour mètre.)

Enfin on se sert quelquefois de grues mobiles, c'est-à-dire dont l'axe, au lieu de tourner dans un massif de maçonnerie, est porté par un bâti de bois ou de fonte monté sur des roulettes. A l'aide de cette disposition, on peut transporter la grue tout entière à l'endroit où l'on doit s'en servir. Les roulettes doivent être placées sous le bâti de manière que, lorsque la grue fonctionne, la verticale menée par le centre de gravité de la machine tout entière, y compris le fardeau, passe à l'intérieur du polygone formé par les points de contact de ces roulettes avec le sol (§ 42). La *fig. 83* représente une grue de ce genre, employée à l'embarcadere de Denain. La partie inférieure forme une espèce de chariot, portant en son milieu une grosse pièce de bois verticale AA, qui sert d'axe à la grue. Cette pièce de bois, qui s'élève à la moitié de la hauteur totale de la grue, est creusée circulairement; elle reçoit dans sa cavité la partie inférieure d'un madrier vertical et cylindrique B, qui peut y tourner librement, et qui forme ainsi comme le pivot de toute la partie mobile. Les madriers horizontaux CC, DD s'appuient, les uns sur la tête de la pièce de bois AA, les autres sur un collier que présente cette pièce: ils sont suspendus par des tringles de fer au madrier vertical B, et servent de points d'appui aux pièces inclinées EE; ces dernières pièces sont d'ailleurs reliées au madrier B par d'autres tringles de fer, qui soutiennent leurs extrémités supérieures. La grue est double: elle est munie de deux treuils à engrenages entièrement pareils, et chacune des pièces inclinées E, E' porte à sa partie supérieure deux poulies montées sur un même axe. Le treuil de droite fonctionne seul, dans la figure ci-jointe: la corde F, qui s'en détache, monte sur l'une des poulies de droite, se rend de là horizontalement sur une des poulies de gauche, et descend pour soutenir le fardeau, à l'aide d'une poulie mobile.

§ 63. **Plan incliné.** — Lorsqu'un corps est appuyé sur une surface plane, et qu'on cherche à le faire glisser sur cette surface, on éprouve une résistance due au frottement. Cette résistance, très grande dans certains cas, est au contraire très faible dans d'autres cas, suivant la nature et le degré de poli que présentent les surfaces qui glissent l'une sur l'autre. C'est ainsi qu'on a une très grande peine à faire glisser une grosse pierre sur le sol, tandis que si elle était posée sur un traîneau muni de patins, et qu'on voulût faire glisser ce traîneau sur la glace, on y parviendrait beaucoup plus facilement. On peut concevoir que la surface du corps qu'on veut faire glisser, et la surface plane sur laquelle il s'appuie, soient tellement polies, que l'on n'éprouve aucune résistance à produire le glissement. Cet état des corps qui glissent est purement idéal, et ne se réalise

endant nous supposerons qu'il soit réalisé, et nous re-
ans ce qui va suivre, le mouvement d'un corps sur une
, comme pouvant s'effectuer sans la moindre résistance
u frottement. Nous avons déjà admis implicitement
e d'analogie, lorsque nous avons parlé des poulies, des
reuil, des engrenages, etc.: car nous n'avons pas tenu
ésistances qui sont toujours occasionnées, dans ces di-
nes, par les frottements des pièces les unes contre les
amment des tourillons contre les surfaces intérieures
s dans lesquels ils tournent. Nous reviendrons plus loin
ances, dont nous faisons abstraction, afin de voir en
difient les résultats auxquels nous arrivons en les né-

tenir en équilibre un corps pesant, *fig. 84*, qui est

plan incliné AB, on
quer une force Q di-
ement au plan. Cher-
niner la grandeur de
e corps est soumis à
on poids, que nous
résenter par la ligne
peut être décomposé
s, dont l'une GE est

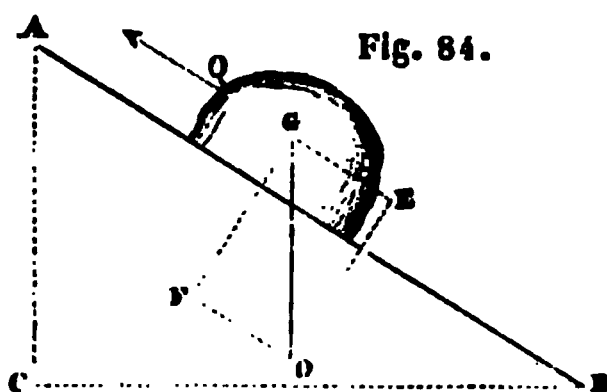


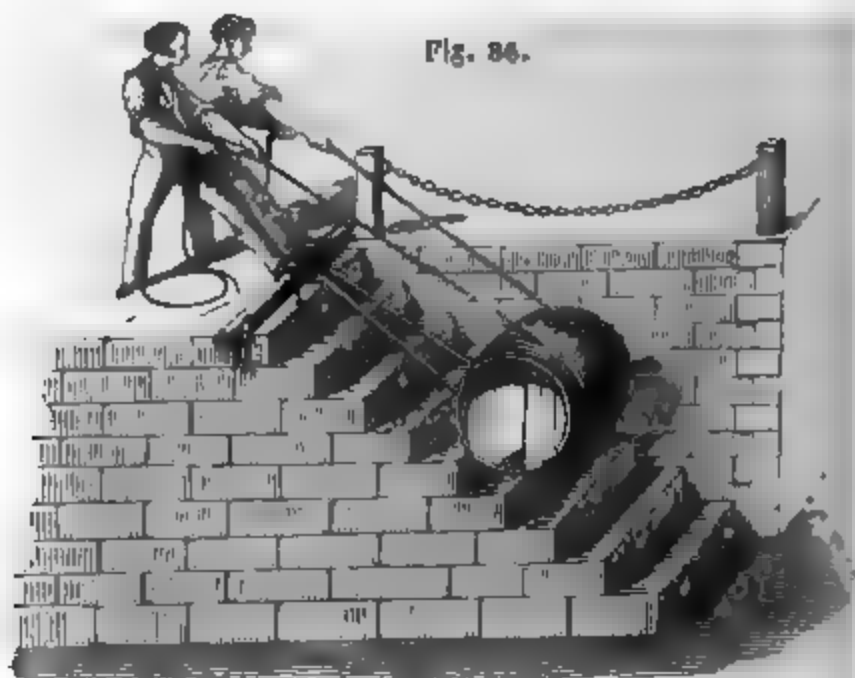
Fig. 84.

plan, et l'autre GF lui est perpendiculaire. La com-
ppuie le corps sur le plan ; mais elle ne tend à le faire
is une direction, ni dans une autre, et est détruite par
lan. L'autre composante GE, au contraire, tend à
re le corps suivant la ligne de plus grande pente du
que la force Q le maintienne en équilibre, il faut
ale et directement opposée à cette composante : on voit
si la force Q ne détruisait qu'une portion de la force
restante, quelque petite qu'elle soit, ferait descendre
que nous admettons qu'il n'y a aucune résistance qui
frottement.

maintenant que, si nous menons la verticale AC, et
BC, nous formerons un triangle rectangle ABC, qui
au triangle rectangle DEG ; car, outre que ces deux
chacun un angle droit, les angles en A et en G sont
ayant leurs côtés parallèles et dirigés dans le même
ort de EG à DG est donc égal au rapport de AC à
ue, si l'on nomme AC la hauteur du plan incliné, et
; on peut dire que le rapport de la force Q au poids

du corps est égal au rapport de la hauteur du plan incliné à sa longueur. Si la hauteur AC est le quart, le cinquième, le sixième de la longueur AB, la force Q sera le quart, le cinquième, le sixième du poids du corps.

§ 64. On emploie quelquefois le moyen représenté par la fig.



pour faire descendre des tonneaux le long d'une rampe, ou d'un escalier. Deux cordes sont attachées par une de leurs extrémités à un morceau de bois, placé transversalement au haut, et maintenu solidement dans cette position ; ces cordes descendent le long du plan incliné, passent sous le tonneau, se relèvent ensuite en embrassant la moitié de son contour, et enfin, se détachant parallèlement à leur direction primitive, elles viennent aboutir dans les mains de deux hommes, qui les tirent suffisamment pour maintenir le tonneau en équilibre. Les deux hommes, en laissant filer lentement les cordes dans leurs mains, font descendre le tonneau aussi doucement qu'ils veulent.

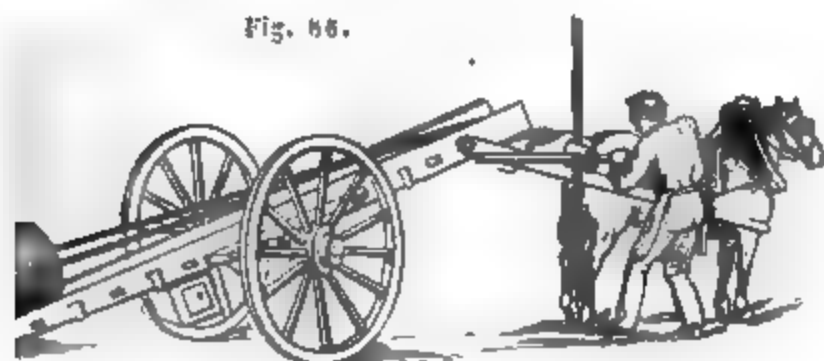
Si les cordes embrassent le tonneau à égale distance de ses deux extrémités, les deux hommes auront la même force de résistance à déployer ; d'un autre côté, les parties de la corde qui reposent sur le plan incliné sont tendues de la même manière que les autres. Le tonneau est donc soumis à l'action de quatre forces égales, parallèles entre elles, et parallèles au plan incliné ; ces quatre forces ont une résultante quadruple de chacune d'elles, et qui doit maintenir le tonneau en équilibre sur ce plan incliné. En admettant que la ten-

in soit la moitié de sa longueur, cette résultante devratié du poids du tonneau : la force déployée par chacun s, étant quatre fois plus petite, ne sera donc que la huitième de ce poids.

ient d'être dit est parfaitement exact dans le cas d'une r'en est pas tout à fait de même dans le cas d'un escalier. s de l'escalier amènent de l'irrégularité dans la descente, ans la grandeur des forces que les hommes doivent appliquer : cordes pour retenir les tonneaux : mais on peut regarder qui varie d'un moment à l'autre, comme étant en es mêmes que si l'escalier était remplacé par une rampe ente.

haquet. — Le haquet est une espèce de charrette à long qui est beaucoup employée pour transporter des ballots surtout des tonneaux. Les limons ne sont pas corps avec d : ils lui sont attachés seulement par une espèce de lon de fer, qui traverse sa partie antérieure, et autour des duquel ils peuvent tourner librement. Ce mode de jonct de faire basculer le brancard, de manière à appuyer ité postérieure sur le sol, dans ce mouvement de bas- nons restent à peu près dans la position horizontale qu'ils aravant, et le cheval ne s'en trouve nullement gêné. Le insi placé, *fig. 86*, forme un plan incliné : le chargement

Fig. 86.



rgement des fardeaux s'y feront donc beaucoup plus faci- s sur une charrette ordinaire. Les limons portent en ou- e voisinage de leur jonction avec le brancard, un tour à el un homme seul peut charger et décharger des fardeaux

o le haquet est convenablement chargé, on relève l'extré- rière du brancard, qui reprend ainsi sa position hori- corde qui s'enroule sur le tour, et qui est destinée à faire

monter les fardeaux sur le brancard incliné, sert ensuite toute la durée du transport, à les maintenir dans la position donnée. A cet effet, on la fait passer sur les filets et l'attache à la partie postérieure du haquet, et, à l'aide d'une corde, lui communique une tension suffisante : puis, afin de maintenir la tension, on attache aux limons un des leviers qui servent à tourner le tour.

Il nous sera facile de déterminer la grandeur de la force nécessaire pour développer un homme, en agissant à l'extrémité de l'un des leviers du tour, pour faire monter, sur le brancard incliné, un fardeau serait attaché à la corde du tour. Admettons que, lorsque le brancard est incliné, la hauteur de sa partie antérieure au-dessus du quart de sa longueur : la tension de la corde devra être égale au poids du corps qu'elle fait monter, d'après ce que nous avons vu dans le § 63. Si le bras de levier de la force développée est dix fois plus grand que le rayon du tour, cette force sera dix fois plus petite que la tension qu'elle communique à la corde : elle sera donc aussi quarante fois plus petite que le poids du corps. Ainsi, avec une force de 30^k, appliquée à l'extrémité d'un des leviers du tour, on pourra faire monter sur le haquet un fardeau pesant 1200^k.

Cette machine, qui présente une heureuse combinaison de la vis et du plan incliné, est de l'invention de Pascal.



Fig. 87.

§ 66. **Coin.** — Le coin sert, en mécanique, pour écarter deux corps l'un de l'autre, ou pour séparer deux portions d'un même corps, lorsqu'il ne peut s'effectuer qu'en faisant un grand effort. On s'en sert notamment pour séparer le bois à brûler. Un coin n'est autre qu'un prisme triangulaire ABC, fig. 87, en bois ou en fer, dont une des faces AB est perpendiculaire aux deux autres faces AC, BC, dernières faces sont d'ailleurs égales l'une à l'autre, en sorte qu'il est isocèle. En appliquant une force perpendiculaire à la face AB, que l'on nomme le front du coin, on détermine son enfoncement dans le corps où on l'a préalablement introduit : et l'on peut déterminer l'écartement des deux bords de la fente avec lesquels les faces AC, BC sont en contact.

Afin de nous rendre compte du mode d'action du coin, nous allons déterminer la grandeur de la force qu'il faudrait ap-

146 AB, pour faire simplement équilibre aux pressions qu'il éprouve en D et en E, de la part des deux bords de la fente. Ces pressions sont perpendiculaires aux faces AC, BC, et nous pouvons les représenter par les lignes *om*, *on* : en construisant le parallélogramme *momp*, nous trouvons *op* pour la ligne qui représente la résultante de ces deux pressions. Pour que la force appliquée sur la face AB fasse équilibre aux deux pressions *om*, *on*, et par conséquent à leur résultante *op*, il faudra qu'elle soit égale et directement opposée à cette résultante. Ainsi *op* doit être perpendiculaire à AB. Mais *om* et *pn* sont respectivement perpendiculaires à AC et BC : donc les deux triangles *omp*, *ABC*, sont semblables, comme ayant leurs côtés perpendiculaires. Il en résulte d'abord que *om* est égal à *pn*, ou à *on*, puisque AC est égal à BC : c'est-à-dire que les deux faces latérales du coin supportent des pressions égales en D et en E. On en déduit en outre que le rapport de la force qui doit être appliquée sur la tête AB, à l'une de ces deux pressions latérales, est le même que celui de la ligne AB à l'une des lignes AC, BC. On voit donc que, plus l'angle ACB sera aigu, plus la force nécessaire pour produire l'écartement des deux points D, E, sera faible.

§ 67. Équilibre des cordes ou chaînes qui supportent des corps pesants. — Lorsqu'une corde ou une chaîne est attachée, par une de ses extrémités, en un point fixe, et qu'elle supporte un corps pesant suspendu à son autre extrémité, elle se dispose verticalement, et sa tension est égale au poids du corps. Mais il arrive souvent que des corps pesants sont suspendus d'une manière beaucoup moins simple : nous allons nous servir d'un exemple bien connu, pour montrer comment on peut, dans tous les cas, déterminer les tensions qui se développent dans les diverses parties de l'appareil de suspension. Nous prendrons pour cela le mode de suspension des lanternes à huile, qui servent à éclairer les rues, et qui ont disparu en grande partie depuis qu'on emploie l'éclairage au gaz.

Une chaîne ABCD, *fig. 88*, est attachée à ses deux extrémités A et D à deux poteaux. Au point C de cette chaîne, est accrochée une poulie F. Une corde, attachée en B, passe sous la gorge de la poulie mobile E, qui supporte la lanterne, puis sur les deux poulies F et G, et vient enfin se fixer à un clou placé dans une boîte H, dans laquelle on peut serrer l'excédant de la corde.

La tension de la corde BEFGH doit être la même dans toute son étendue, d'après ce que nous avons vu à l'occasion de la poulie (§ 53). Cette tension s'obtiendra en observant que les tensions des deux cordons EB, EF, doivent avoir une résultante égale au poids de la lanterne : en sorte que, si l'on porte sur la verticale qui passe

par le point E une longueur Ee qui représente ce poids, et que, par le point e , on mène des parallèles aux cordons EB, EF, on formera



Fig. 85.

un parallélogramme dont les côtés représenteront les tensions de ces deux cordons. Ainsi que nous l'avons déjà vu, ces tensions devant être égales, il est nécessaire que les cordons EB, EF soient également inclinés sur la verticale.

Pour déterminer les tensions des trois parties AB, BC et CD de la chaîne, nous remarquons que cette chaîne est soumise 1° en B, à une force dirigée suivant BE, et égale à la tension de la corde, tension dont nous venons de trouver la grandeur. 2° au point C, à une force qui est la résultante Ff des tensions des cordons FE, FG. Les tensions des deux parties BA, BC, faisant équilibre à la force qui agit suivant BE, doivent avoir une résultante égale et contraire à cette force. Si donc nous portons, à partir du point B, sur le prolongement de BE, une longueur Bb égale à la tension de la corde et que par le point b nous menions des parallèles aux parties BA et BC de la chaîne, nous trouverons les lignes Bm , Bn , qui représenteront leurs tensions. De même, si nous portons à partir du point C, sur le prolongement de CF , une longueur Cc égale à Ff , et que nous formions le parallélogramme $Cpeq$, les lignes Cp , Cq représenteront les tensions des parties BC, CD.

La configuration de la chaîne ABCD devra être telle que les B_n , C_p , déterminées comme on vient de le dire, soient entre elles, puisqu'elles représentent toutes deux la tension. Pour évaluer en kilogrammes les tensions ainsi déterminées, il ira de chercher combien de fois les lignes qui les représentent dépassent la ligne qui a été choisie pour représenter un kilomètre.

68. Chaîne des ponts suspendus. — Nous pouvons en faire voir à l'aide des principes exposés précédemment, comment on détermine la figure qu'on doit donner aux chaînes qui supportent un pont suspendu.

Nous supposons, pour simplifier, que le pont est suspendu à une seule chaîne. Il est clair que, lorsqu'il y en aura deux, la figure de chacune d'elles sera la même que si elle était seule pour supporter le pont : il n'y aura de différence que dans la charge totale, et par suite dans les tensions des diverses parties de la chaîne : ces tensions seront moitié moindres, dans le cas où le pont sera supporté par deux chaînes.

Soit *abcdefgh*, fig. 89, la chaîne dont on veut déterminer la

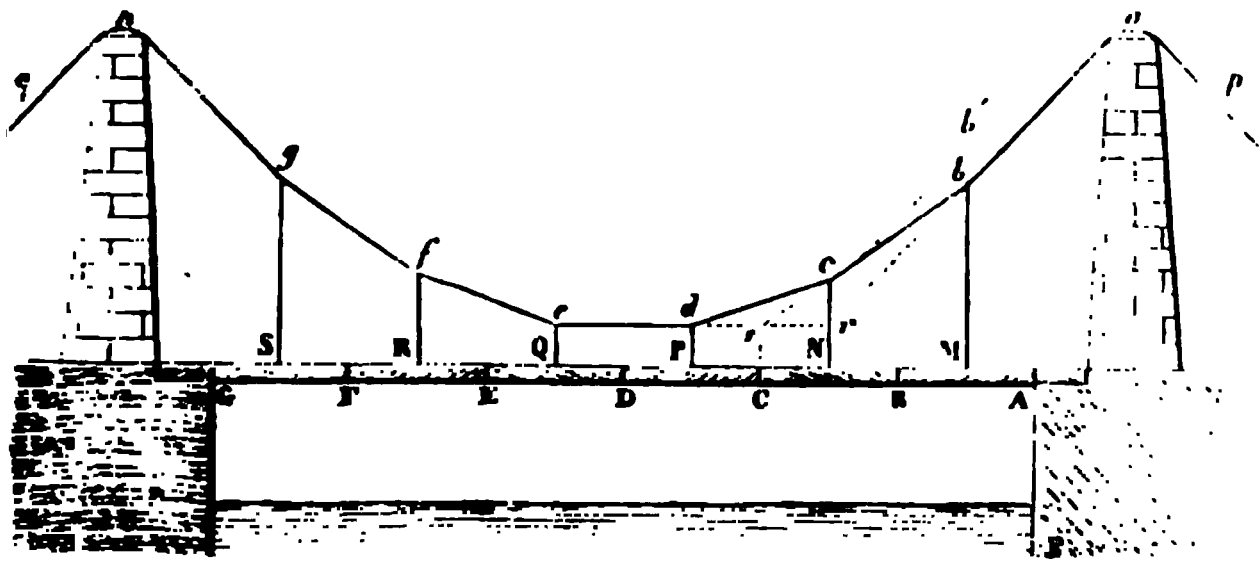


Fig. 89.

figure : et soient M, N, P, Q, R, S, les barres de fer qui servent à suspendre le tablier du pont. Voyons d'abord à quelle condition la chaîne et les barres de suspension doivent satisfaire, pour que le pont soit convenablement suspendu. Si le tablier était coupé transversalement aux points A, B, C, D, E, F, G, chacune des barres trait à supporter la portion de ce tablier au milieu de laquelle elle est fixée. Pour que le pont soit bien construit, il faut que les diverses portions du tablier, ainsi détachées les unes des autres, *en restent pas moins sur un même plan horizontal* Car s'il en est autrement, si quelques unes s'abaissent, d'autres s'élèvent

raient, et le tablier présenterait dans son ensemble une figure sinueuse. Avant d'être coupé en diverses portions, il aurait donc tendu également à prendre cette figure sinueuse: sa flexibilité lui aurait permis de se déformer un peu; mais comme il n'aurait pu subir toute la déformation qui se produirait dans le cas où les parties AB, BC, CD,..... seraient complètement détachées les unes des autres, il en serait résulté des tensions très inégales des barres M, N, P..... Ainsi la condition énoncée précédemment doit être remplie, pour que le tablier du pont reste horizontal dans toute son étendue, et que les barres de suspension soient également chargées. C'est cette condition qui va nous permettre de trouver la figure de la chaîne, et les longueurs des diverses barres qui la réunissent au tablier.

Après avoir divisé le tablier en parties égales, par les points A, B, C, D,..... on tracera des lignes verticales par les milieux de ces divisions, pour indiquer les directions des barres de suspension. On placera ensuite, entre les deux barres du milieu, le côté *de* de la chaîne, côté qui doit être horizontal, mais dont la hauteur au-dessus du tablier sera prise à volonté.

Pour trouver la direction du côté *ab*, on observera que les trois portions AB, BC, CD du tablier, qu'on peut supposer attachées ensemble, sont en définitive supportées par les deux chaînons *ab* et *de*: si l'on venait à couper ces chaînons, la portion ABCD du pont tomberait, puisqu'on admet qu'elle est détachée du reste du pont en A et en D. Les tensions des chaînons *ab* et *de* sont donc équilibre au poids de cette portion du pont, c'est-à-dire qu'elles doivent avoir une résultante égale à son poids, et dirigée suivant la verticale N, qui passe par son centre de gravité. Il résulte de là que les deux chaînons *ab* et *de* prolongés doivent se rencontrer sur cette verticale. On prolongera donc la ligne *de* jusqu'à la rencontre de la verticale N en *r*: puis, en joignant ce point *r* au point *a*, on aura la direction du chaînon *ab*, et par suite l'extrémité supérieure *b* de la barre M.

Pour déterminer la direction du chaînon *bc*, on observera de même que la tension de ce chaînon, et celle de *de*, sont équilibre au poids de la portion BCD du pont: ces deux chaînons prolongés doivent donc se rencontrer en un point situé sur la verticale passant par le milieu C de cette portion BCD. Ainsi on prendra le point de rencontre *s* de cette verticale avec le prolongement de la ligne *de*: on joindra ce point *s* au point *b*, déterminé précédemment, et l'on aura la direction du chaînon *bc*, et l'extrémité *c* de la barre N.

Enfin on joindra le point c au point d, et l'on aura ainsi la forme

moitié de la chaîne. L'autre moitié sera toute pareille, et ses parties se détermineront de la même manière.

Quant aux parties extérieures ap , hq , on leur donnera la même tension qu'aux chaînons ab , gh . La chaîne étant simplement posée sur la partie supérieure a du massif de maçonnerie, et pouvant glisser sur ce massif d'un côté ou d'un autre, on doit regarder les tensions des chaînons ab , ap , comme étant égales; la résultante des deux tensions sera donc dirigée verticalement, si ab et ap sont également inclinés; et cette résultante, qui n'est autre chose que la pression exercée par la chaîne sur le massif, ne tendra pas à renverser, ni à droite ni à gauche.

Les tensions des diverses parties de la chaîne se détermineront très facilement. Si nous considérons, par exemple, les deux chaînons ab , bc , nous voyons que leurs tensions doivent avoir une résultante égale au poids de la portion AB du pont, et dirigée verticalement, du bas en haut: on n'aura donc qu'à décomposer cette résultante, en b' , qui est connue, en deux composantes dirigées suivant ba et bc , et l'on aura les tensions de ces deux chaînons.

MACHINES A L'ÉTAT DE MOUVEMENT UNIFORME.

§ 69. Les diverses machines dont nous nous sommes occupés jusqu'ici ont été considérées uniquement sous le point de vue de l'équilibre des forces qui leur étaient appliquées. Nous avons vu ainsi comment les efforts se transmettent à l'aide des machines, en se modifiant souvent d'une manière très considérable: en sorte que l'emploi d'un levier, d'un tour, d'un cric, etc., permet de faire équilibre à une résistance très grande, avec une force beaucoup plus petite. Sous ce point de vue, on peut dire que les machines multiplient les forces.

Mais on n'aurait qu'une idée très imparfaite des machines, si l'on se contentait de les considérer ainsi à l'état d'équilibre: cela pourrait même avoir de graves inconvénients, en ce qu'on serait porté à leur attribuer une puissance tout autre que celle qu'elles ont réellement. Si l'on voit encore maintenant beaucoup de personnes qui cherchent le mouvement perpétuel (nous entrerons plus loin dans quelques détails sur cette question), cela tient uniquement à ce qu'elles ont quelques notions sur l'équilibre des forces qui agissent sur les machines, et que ces notions n'ont pas été complétées, comme elles devraient toujours l'être, par la considération des mouvements des diverses pièces sur lesquelles ces forces agissent.

Nous allons nous occuper de ce complément indispensable, c'e-

78 MACHINES A L'ÉTAT DE MOUVEMENT UNIFORME.

à-dire de l'étude des machines à l'état de mouvement. Nous supposerons d'abord que les diverses parties dont une machine se compose soient animées de mouvements uniformes : plus tard nous examinerons l'influence que la non-uniformité de ces mouvements peut avoir sur les résultats auxquels nous allons parvenir.

Lorsqu'une machine est à l'état de mouvement uniforme, les forces qui lui sont appliquées doivent se faire équilibre, tout aussi bien que si la machine ne se mouvait pas : car si elles ne se neutralisaient pas mutuellement, elles modifieraient nécessairement les mouvements des diverses pièces dont la machine se compose. Les résultats que nous avons obtenus, relativement à la grandeur de la force capable de faire équilibre à une résistance donnée, à l'aide d'une machine, conviennent donc encore dans le cas où la machine se meut uniformément.

§ 70. *Ce qu'on gagne en force, on le perd en vitesse.* — En examinant les diverses machines que nous avons étudiées jusqu'à présent, il nous sera facile de constater l'existence du principe suivant : *Ce qu'on gagne en force, on le perd en vitesse.*

Prenons d'abord pour cela le levier, droit ou courbé, sur lequel agissent des forces dirigées perpendiculairement aux bras du levier. Les deux forces P , Q , qui se font équilibre sur le levier ACB , fig. 90,

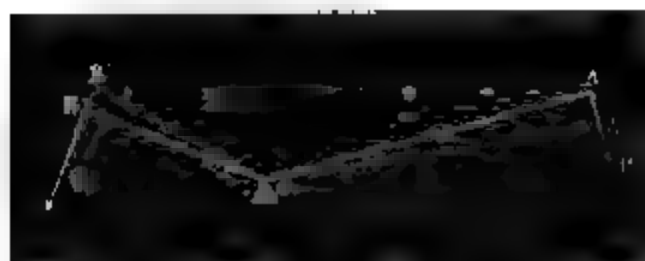


Fig. 90.

doivent être entre elles dans le rapport inverse des bras de levier AC , BC . Si le levier tourne uniformément autour du point d'appui C , il prendra, au bout d'un instant, la position $A'CB'$; et, dans ce

mouvement, les deux points A et B décriront deux arcs de cercle AA' , BB' , proportionnels à leurs rayons AC , BC , puisque ces arcs correspondent à des angles ACA' , BCB' égaux entre eux. On voit donc que, si AC est double, triple, quadruple de BC , on pourra bien avec une force P faire équilibre à une force Q deux fois, trois fois, quatre fois plus grande ; mais que, d'un autre côté, le chemin parcouru par le point d'application de cette force Q sera deux fois, trois fois, quatre fois plus petit que celui que parcourra dans le même temps le point d'application de la force P . La vitesse du premier point sera d'autant plus faible par rapport à la vitesse du second, que la force Q qui agit sur ce premier point sera plus grande par

: on peut donc bien dire ici que ce qu'on gagne en vitesse.

mobile à cordons parallèles (*fig. 61*, page 48), la doit être appliquée à la corde n'est que la moitié de la résistance : mais aussi, pour que la corde maintienne en équilibre : mais aussi, pour que la corde maintienne en équilibre, il faut que la main qui tire la corde exerce une certaine quantité, il faut que la main qui tire la corde exerce une quantité double. Le principe énoncé se vérifie dans ce cas.

représentées par la *fig. 63* (page 49), la force de la corde n'est, comme nous l'avons vu, que la moitié de la résistance à vaincre. Mais, pour que ce poids monte, il faut que la longueur de chacun des cordons qui sont attachés à la moufle inférieure diminue d'un tiers, car la longueur totale de la corde reste la même, et par cela que la main qui tire l'extrémité libre de la corde parcourt six mètres : donc, si la puissance employée est six fois la résistance à vaincre, d'une autre part elle ne parcourt que la moitié de la distance que la main qui tire parcourt elle-même.

représenté par la *fig. 76* (page 59), nous avons trouvé que la force qui agit sur la manivelle n'est que la quinzième partie de la résistance à vaincre. Voyons dans quel rapport se trouvent les points d'application de ces deux forces. Si le pignon C fera un tour entier, la roue B fera trois tours, mais le pignon D, qui engrène avec elle, ayant dix dents, devra faire trois tours. Pour faire faire un tour entier à la manivelle, il faut par conséquent faire avancer la crémaillère de trois tours : à la circonférence de ce pignon, il faudra donc parcourir trois fois la distance : et si l'on observe que, le bras de la manivelle est cinq fois plus grand que le rayon du pignon C, la distance parcourue est cinq fois plus grande que celle de la manivelle : en définitive la puissance appliquée à la manivelle parcourt quinze fois plus grand que celui qui parcourt la distance à la résistance.

79, pag. 62 : nous avons vu qu'une seule force, appliquée à la manivelle, devrait être de 20 kilogrammes pour vaincre une résistance de 1200 kilogrammes : la puissance est donc dix fois la résistance. Pendant que le treuil fait un tour, la manivelle fait dix tours, puisque le pignon fixé à la manivelle porte dix fois moins de dents que la roue fixée au treuil : la manivelle étant trois fois plus grande que le treuil, la circonférence qu'elle décrit est trois fois plus

grande que la circonférence du treuil : ainsi, pendant qu'elle s'enroule sur le treuil d'une quantité égale à cette dernière, la manivelle parcourt un chemin 30 fois plus grand que la quantité dont s'élève le poids suspendu à la poulie fixe ; la moitié de la quantité dont la corde s'enroule sur le treuil, donc, si d'une part la puissance est 60 fois plus petite que la charge, on voit que d'une autre part elle parcourt un chemin 60 fois plus grand que celui qu'elle fait parcourir à cette charge.

§ 71. Dans les divers exemples qu'on vient de donner, les points d'application des forces se déplacent suivant la direction même de ces forces, soit dans le même sens, soit en sens contraire. C'est ainsi que la main qui tire une corde marche dans la même direction que la corde ; la force appliquée à une manivelle est dirigée suivant la tangente à la circonférence que la manivelle décrit ; le corps qui est élevé à l'aide des moutons monte verticalement, c'est-à-dire en sens contraire de la direction de son poids. Mais il n'en est pas toujours ainsi ; nous allons le voir.

Lorsqu'on fait monter un corps pesant le long d'un plan incliné en exerçant une force de traction Q , dirigée parallèlement au plan (fig. 91), le point d'application D de cette force Q se

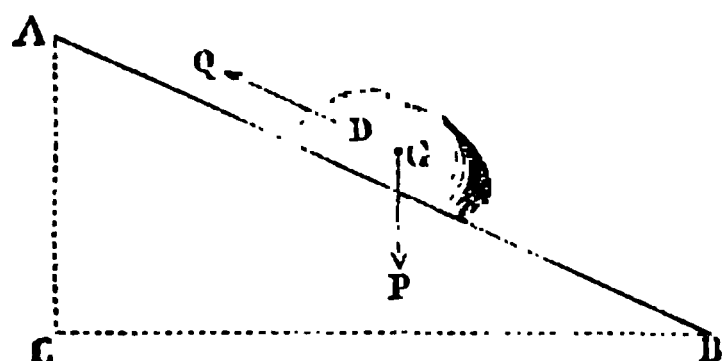


Fig. 91.

suivre sa direction. Le centre de gravité du corps est appliqué la force P , égale au poids du corps. Le corps ne se meut pas suivant la direction de la force P . Les chemins parcourus par les points D et G des deux forces sont les mêmes, et cependant

les forces Q et P ne sont pas égales, puisqu'elles sont en raison inverse du rapport de la hauteur AC du plan incliné à sa longueur AB . Il semble donc que, dans ce cas, le principe énoncé au commencement du paragraphe précédent n'est plus vrai. Mais si, au lieu de prendre le déplacement total du point d'application de la force, on prend la quantité dont ce point s'est déplacé dans la direction de la force, on reconnaîtra que le principe dont il s'agit est encore applicable. Lorsque le corps aura glissé sur le plan incliné, depuis le point B jusqu'au point A , il se sera élevé d'une hauteur égale à AC : en prenant cette hauteur pour le chemin parcouru par le point d'application de la force P , et comparant à la longueur AB , parcourue en même

l'application de la force Q , on verra que, si d'une part la force est à moitié, le tiers, le quart du poids P , d'une autre part elle fait un chemin double, triple, quadruple du chemin parcouru par le point d'application de la force P , c'est-à-dire de la hauteur à laquelle le corps s'élève en montant sur le plan incliné.

Les fois que le point d'application A d'une force F , fig. 92 se déplacera en décrivant une ligne droite obliquement par rapport à la verticale, on abaissera du point B une perpendiculaire BC sur la direction de la force, la distance AC sera ce qu'on appelle le chemin parcouru par le point d'application de la force F , estimé suivant la direction de la force. En ayant soin de prendre toute la ligne AC pour le déplacement du point d'application de la force, on recon-
 Fig. 92.



Fig. 92. Fig. 93.

du § 70 est vrai dans tous les cas, sous ce point de vue, le principe énoncé au commen-
 quel sont appliquées des forces dirigées obliquement par rapport aux bras du levier.

Pour l'équilibre de ce levier, il faut que les forces P et Q qui lui sont appliquées, fig. 94, soient inversement proportionnelles au

li-
 Cb,
 du
 appui C
 direc-
 s deux
 Lors-
 levier
 a d'une
 quantité
 au point



Fig. 94.

C, le point A viendra en A' , et le point B en B' ; les chemins parcourus par ces points, estimés suivant les directions des forces, seront AD , BE et ce que nous devons démontrer, c'est que le rapport de AD à BE est le même que le rapport de P à Q . Pour y arriver, nous observerons que, les arcs de cercle décrits étant très petits, nous pourrions les regarder comme de petites lignes droites respectivement perpendiculaires à AC et BC . Le triangle ADA' est semblable au triangle ACA' , car ils ont leurs

côtés perpendiculaires entre eux deux à deux : on en conclut donc la proportion

$$\frac{AD}{Ca} = \frac{AA'}{AC}.$$

Mais les triangles BEB', BCb sont aussi semblables, pour la même raison : on en conclura donc de même

$$\frac{BE}{Cb} = \frac{BB'}{CB}.$$

D'ailleurs AA' et BB' étant des arcs de cercle correspondants à des angles au centre égaux entre eux, doivent être proportionnels aux rayons AC et CB : les deux proportions qu'on vient d'écrire ont donc leurs derniers rapports égaux, en sorte que les premiers rapports forment la proportion suivante :

$$\frac{AD}{Ca} = \frac{BE}{Cb}.$$

ou bien, en changeant l'ordre des deux moyens,

$$\frac{AD}{BE} = \frac{Ca}{Cb}.$$

Si enfin nous nous rappelons que les perpendiculaires Ca et Cb sont entre elles dans le rapport de Q à P, nous en concluons que AD et BE sont aussi entre eux dans le même rapport : c'est ce que nous voulions démontrer.

§ 72. Quelle que soit la complication d'une machine, dans laquelle deux forces se feraient équilibre, nous parviendrions toujours à vérifier, comme nous l'avons fait dans les exemples précédents, que *ce qu'on gagne en force on le perd en vitesse*, en donnant à cet énoncé la signification qui résulte des développements dans lesquels nous venons d'entrer. La généralité de ce principe a été démontrée mathématiquement : mais nous renverrons, pour la démonstration, aux traités de mécanique rationnelle (1). Les vérifications assez nombreuses que nous en avons faites, et que nous pourrions multiplier autant que nous voudrions, suffisent pour que nous l'admettions sans aucune difficulté. Nous regarderons donc désormais comme démontré que, *toutes les fois que deux forces, agissant sur une machine, se font équilibre, elles sont entre elles dans le rapport inverse des chemins parcourus en même temps par leurs points d'application, estimés suivant leurs directions respectives*.

On pourra même se servir de ce principe général pour trouver le rapport qui doit exister entre deux forces appliquées à une machine, pour qu'elles se fassent équilibre : nous allons en donner quelques exemples.

(1) Ce principe n'est autre chose que le principe des vitesses virtuelles, que Lagrange a adopté comme devant servir de base à la statique, ou à la science de l'équilibre des forces.

Presse à vis. — La fig 93 représente une machine destinée à presser les corps, et qu'on appelle une *presse*. Une vis A, un écrou B qui est fixe; elle se termine à la partie supérieure par un renflement de deux cônes dirigés perpendiculairement l'un sur l'autre, et par lequel on introduit un levier dans ces trous, et par lequel on fait tourner la vis. Quand on retire le levier, on continue de tourner la vis, on peut donc lui faire faire des tours qu'on appelle des *revolutions* de vis, produisant la compression de la vis.

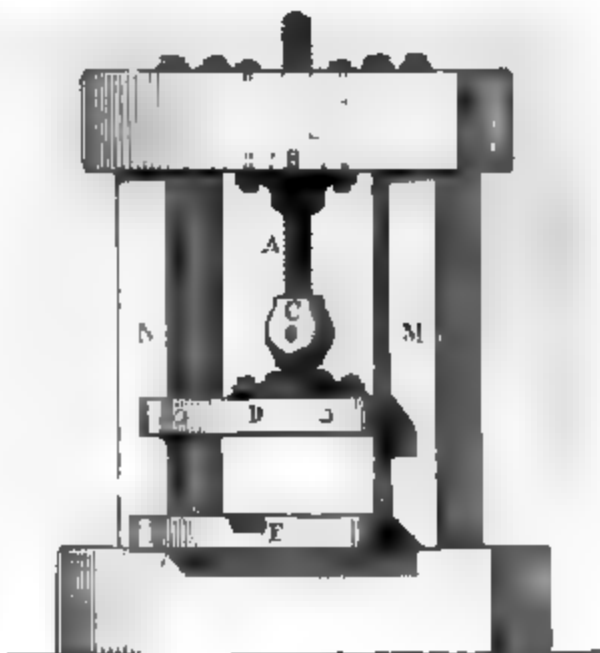


Fig. 93.

On fait tourner la vis dans un sens ou dans l'autre. Un plateau mobile, qui peut être ascendant ou descendant, mais sans tourner sur cela il est dirigé par les deux montants verticaux N et M, qui pénètrent dans deux échancrures pratiquées dans les montants et d'autre. Un plateau fixe E est destiné à recevoir le corps qui doit être comprimé. On aperçoit une espèce de rebord antérieur de ce plateau fixe : il correspond à une rainure tout autour de sa face supérieure, et est destiné à recueillir le liquide que la compression peut faire sortir du corps comprimé.

Quand on fait tourner la vis dans le sens convenable, elle fait descendre le plateau D, qui vient ainsi s'appuyer sur le corps qui est sur le plateau fixe ; et, en continuant à agir sur la vis, on exerce sur ce corps une pression qui peut devenir extrêmement forte. Pour se faire une idée de la grandeur de cette pression, il suffit de dire que, chaque fois qu'on fait faire à la vis un tour complet, on abaisse en même temps d'une quantité qu'on appelle la *course* de la vis, pendant que le point d'application de la puissance motrice parcourt une circonférence de cercle dont le rayon est égal à la longueur du levier, le point d'application de la résistance marche

d'une quantité égale au pas de la vis. Le principe énoncé dans § 72 nous autorise à en conclure que : le rapport de la puissance à la résistance est le même que le rapport du pas de la vis à la circonférence qui a pour rayon la longueur du levier. Si l'on pense à la petitesse du pas de la vis, relativement à cette circonférence, on verra qu'à l'aide d'une force assez faible, appliquée à l'extrémité du levier, on peut exercer une pression extrêmement grande sur le corps placé entre les deux plateaux.

§ 74 **Vis sans fin.** — On dispose quelquefois une vis à côté d'une roue dentée, de manière que le filet de la vis s'engage entre les dents de la roue, et que, lorsque la vis tourne, elle fait nécessairement tourner la roue. C'est ce que l'on nomme l'*engrenage de la vis sans fin*. Lorsqu'une vis ordinaire s'engage dans un écrou, et qu'on la fait tourner dans cet écrou, elle s'y enfonce progressivement, et il arrive bientôt un moment où l'on ne peut plus la faire tourner dans le même sens, parce que l'écrou se trouve à l'extrémité du filet de la vis. Ici il n'en est pas de même, on peut faire tourner indéfiniment la vis, et elle fera toujours tourner la roue de la même manière. C'est de là que lui vient le nom de *vis sans fin*.

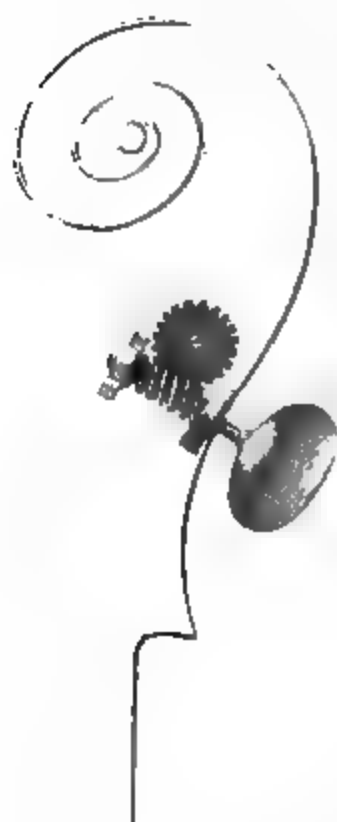


Fig. 96.

La fig. 96 montre une vis sans fin adaptée à une contre-basse, pour serrer une des cordes de cet instrument. La vis engrene avec une roue qui porte 20 dents, et cette roue est fixée à un petit cylindre sur lequel s'enroule la corde. Lorsque la vis fait un tour entier, la roue avance d'une dent : en sorte que la roue tourne 20 fois moins vite que la vis. Il résulte de là que l'effort que la main exerce sur la poignée qui termine la vis, pour serrer la corde, est 20 fois plus petit que celui qui serait nécessaire pour produire le même effet, si cette poignée était directement adaptée au cylindre sur lequel la corde s'enroule.

§ 75 **Treuil différentiel.** — On a vu dans le § 55 (pag. 50) que, pour qu'il y ait équilibre entre la puissance et la résistance appliquées à un treuil, il faut que le rapport de ces deux forces soit égal

au rapport du rayon du treuil au bras de levier de la puissance. On

conçoit qu'à l'aide d'une pareille machine, on puisse, avec une puissance donnée, faire équilibre à une résistance aussi grande qu'on voudra : puisqu'il suffit, pour cela, de prendre un treuil dont le rayon soit assez petit relativement au bras de levier de la puissance. Mais, en réalité, il y a des limites qu'il est impossible de dépasser : d'une part, on ne peut pas augmenter outre mesure la longueur du levier sur lequel doit agir la puissance, sans quoi on aurait une machine extrêmement gênante et difficile à manœuvrer, d'une autre part, on ne peut pas trop diminuer le rayon du treuil, car il ne conserverait plus une solidité suffisante pour ne pas se briser sous l'effort de la résistance à vaincre. Le treuil différentiel a été imaginé pour produire ce que l'on ne peut pas obtenir avec le treuil ordinaire; avec le treuil différentiel, on peut sans difficulté faire équilibre à une résistance aussi grande que possible, à l'aide d'une puissance aussi petite qu'on voudra.

Ce treuil ne diffère du treuil ordinaire, qu'en ce que sa surface est formée de deux cylindres de rayons inégaux, fig. 97, au lieu

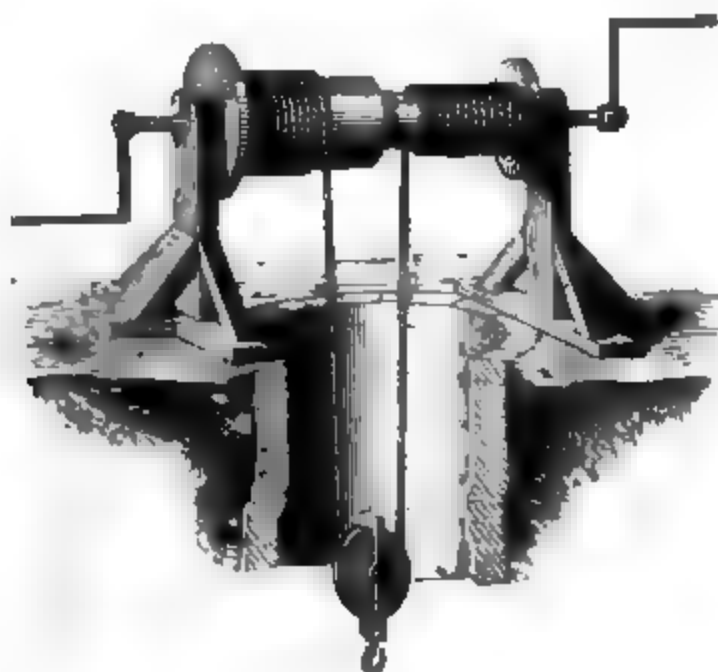


Fig. 97.

l'un seul. Une corde est attachée par une de ses extrémités sur le plus gros des deux cylindres; après s'y être enroulée de quelques tours, elle s'en détache, vient passer sous la gorge d'une poulie mobile, puis remonte et s'enroule sur le plus petit des deux cylin-

dres, auquel elle est attachée par sa seconde extrémité. Le corps qui doit être soulevé est suspendu à la chape de la poulie mobile. Des manivelles adaptées aux extrémités du treuil servent à le faire tourner. La corde est disposée, sur les deux parties du treuil, de telle façon que, lorsqu'on le fait tourner dans un sens ou dans l'autre, elle s'enroule d'un côté et se déroule en même temps de l'autre côté. Pour faire monter le corps suspendu à la poulie, on fait tourner le treuil de manière que la corde s'enroule sur le gros cylindre, et se déroule sur le petit. Supposons, par exemple, qu'on ait fait faire deux tours au treuil : la portion de la corde qui s'en détache pour soutenir la poulie se sera raccourcie, d'un côté, de deux fois la circonférence du gros cylindre, et elle se sera allongée en même temps, de l'autre côté, de deux fois la circonférence du petit : donc elle ne sera raccourcie, en réalité, que de deux fois la différence qui existe entre les circonférences des deux cylindres. Cette diminution de longueur de la partie libre de la corde, se répartissant également entre les deux cordons qui soutiennent la poulie, et qui peuvent être regardés comme parallèles, il en résulte que la poulie aura monté d'une quantité égale à la différence des circonférences des deux cylindres. Ainsi, pendant que le point d'application de la puissance parcourt deux circonférences ayant pour rayon le bras d'une des manivelles, le point d'application de la résistance ne marche que de la différence entre les circonférences des deux parties cylindriques du treuil. Si nous appliquons donc le principe du § 72, et que nous observions que les circonférences sont entre elles dans le même rapport que leurs rayons, nous serons conduits à la proposition suivante : Dans le treuil différentiel, la puissance est à la résistance comme la différence des rayons des deux cylindres du treuil est au double de la longueur du levier à l'extrémité duquel la puissance est appliquée.

On reconnaît par là l'exactitude de ce qui a été annoncé plus haut, c'est-à-dire qu'avec le treuil différentiel, une puissance donnée peut faire équilibre à une résistance aussi grande qu'on veut : puisqu'il suffit, pour cela, de diminuer suffisamment la différence entre les rayons des deux parties cylindriques du treuil, ce qui n'empêchera pas de lui donner la solidité convenable, et ne le rendra pas plus gênant à employer.

§ 76. **Travail des forces.** — En vertu du principe du § 72, dont nous venons de donner quelques applications, si une puissance et une résistance se font équilibre sur une machine, et que le chemin parcouru par la puissance, estimé suivant sa direction, soit 2 fois, 3 fois, 10 fois plus grand que celui que parcourt la résistance, estimé également suivant sa direction, la puissance doit être 2 fois, 3 fois,

est petite que la résistance. Il en résulte que, si l'on multiplie le nombre de kilogrammes qui représente la puissance, par le nombre de mètres qui représente le chemin parcouru par son point d'application, estimé suivant sa direction, et qu'on en fasse autant avec la résistance, les deux nombres qu'on trouvera par ces deux opérations seront exactement les mêmes.

Le *travail d'une force* le produit ainsi obtenu, en multipliant la force, évaluée en kilogrammes, par le chemin que parcourt le point d'application, estimé suivant sa direction, et évalué en mètres. On énoncera donc, de la manière suivante, la proposition qui vient d'être question : Lorsqu'une puissance et une résistance sont en équilibre sur une machine, le travail développé par la puissance, pendant un temps déterminé, est égal au travail développé par la résistance, pendant le même espace de temps.

Pour justifier l'expression de travail employée ici, nous allons voir que le produit, auquel nous donnons ce nom, peut servir de mesure à ce que l'on entend habituellement par le mot *travail*. D'abord, si l'on réfléchit aux divers travaux effectués, soit par les machines, telles que les roues hydrauliques, les machines à vapeur, soit par les animaux, soit par les hommes lorsqu'ils ont à employer leur force musculaire, on reconnaît qu'il s'agit toujours de déplacer les points d'application des forces à vaincre. Ainsi le travail consistera à élever des corps tels que des pierres, de l'eau ; à changer les positions respectives des molécules d'un corps solide, comme dans le martelage du fer chaud et du cuivre ; à séparer ces molécules, comme dans le travail du bois, de la pierre, dans la mouture des grains. Dans différents cas, et dans tous les autres qu'on pourrait citer, le travail ne consiste pas seulement à faire équilibre à une puissance, mais encore à déplacer le point d'application de la puissance vaincue. L'idée de travail comprend donc à la fois l'idée de puissance vaincue, et l'idée d'un chemin parcouru par son point d'application.

Le *travail* effectué par un ouvrier, c'est-à-dire ce qui lui donne droit de base à la somme qu'on lui paie, dépend évidemment des éléments que nous venons de trouver dans l'idée de travail. Si deux ouvriers sont employés à élever des terres à la pelle, l'un à un autre, *fig. 98*, et que l'un d'eux en élève deux fois plus que l'autre, il est clair qu'il aura effectué un travail double, et par conséquent il devra recevoir un salaire double de celui de l'autre ouvrier. De même, si l'un de ces ouvriers élève

88 MACHINES A L'ÉTAT DE MOUVEMENT UNIFORME.

une certaine quantité de terre à 2 mètres de hauteur, tandis l'autre élève la même quantité à 1 mètre seulement, le premier aura fait un travail double du travail fait par le second, et sera payé deux fois plus. On voit donc que, à égalité de vaincue, le travail est proportionnel à la grandeur du chemin parcouru au point d'application de cette force, estimé sa



Fig. 98.

sa direction; et aussi que, à égalité de chemin parcouru, le travail est proportionnel à la grandeur de la résistance vaincue. Il suit nécessairement que le travail est proportionnel au produit de la résistance vaincue, par le chemin parcouru par son point d'application, estimé suivant sa direction; en sorte qu'on peut prendre ce produit pour mesure du travail.

D'après ce qu'on vient de dire, si la résistance vaincue est le double, le triple, etc. de ce qu'elle était, et que le chemin parcouru par son point d'application devienne en même temps deux, trois fois plus petit, la quantité de travail effectuée restera la même. C'est ce que nous allons mettre complètement en évidence à l'aide d'un exemple très simple. Un ouvrier agit successivement sur deux roues à chevilles exactement pareilles, fig. 99 et 100: le bras du treuil A de la première roue est le tiers du rayon du treuil de la seconde roue, mais le corps suspendu à la corde du treuil pèse trois fois plus que celui qui est suspendu à l'autre corde. *Il en résulte que l'ouvrier devra être placé de la même manière sur les deux roues, pour faire équilibre à l'un ou à l'autre des deux*

élever. Si cet ouvrier fait faire le même nombre de tours à chacune des deux roues, le plus petit des deux corps parcourra une distance verticale trois fois plus grande que l'autre corps, qui pèse trois fois plus que lui : or, le travail développé dans ces deux cas sera évidemment le même, puisque l'ouvrier se trouvera dans des conditions tout à fait identiques, en agissant sur l'une ou sur l'autre des deux roues.

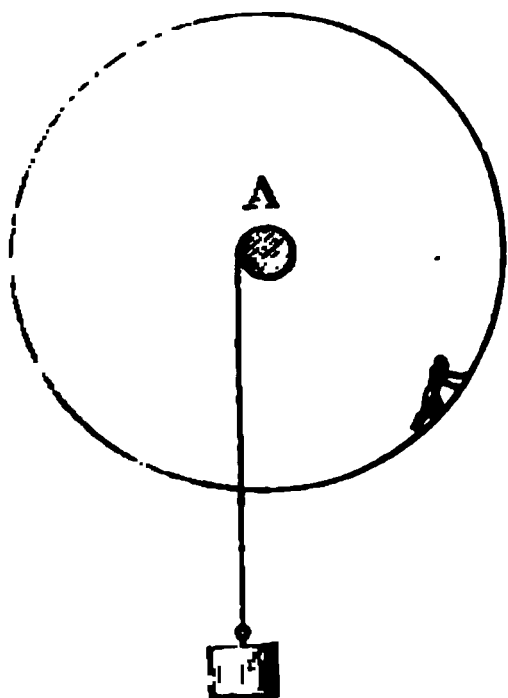


Fig. 90.

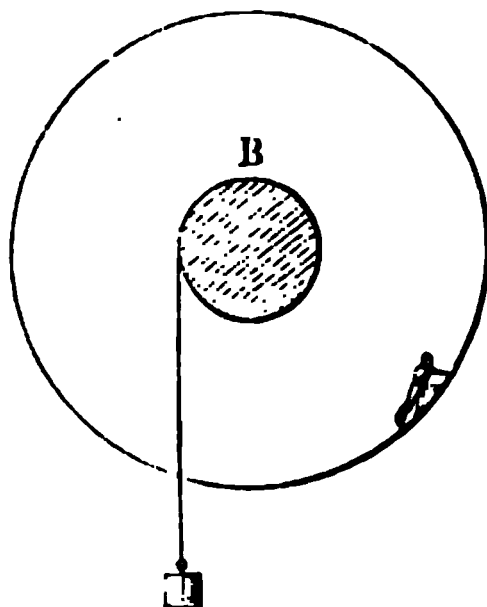


Fig. 100.

§ 78. **Unité dynamique, kilogrammètre.** — D'après la définition qui a été donnée de ce qu'on entend par le travail d'une force, il est facile de voir que l'unité de travail sera le travail développé par l'élévation d'un corps pesant 1 kilogramme, à 1 mètre de hauteur. Cette unité est souvent désignée sous le nom d'*unité dynamique*, et aussi sous celui de *kilogrammètre*.

C'est ainsi qu'on dit que le travail développé par l'élévation d'un corps pesant 8 kilogrammes, à 3 mètres de hauteur, est égal à 24 unités dynamiques, ou à 24 kilogrammètres; et on le désigne, en abrégé, par 24^{km} . On dit aussi que ce travail est égal à 24 kilogrammes élevés à 1 mètre de hauteur. Toutes ces expressions sont équivalentes, et peuvent être employées indistinctement.

§ 79. **Travail moteur, travail résistant.** — Les forces qui agissent sur une machine en mouvement ne jouent pas toutes le même rôle. Les unes tendent à augmenter la vitesse du point auquel elles sont appliquées; elles sont dirigées dans le sens du mouvement de ce point, ou au moins leur direction fait un angle aigu avec la direction de ce mouvement. Les autres tendent à diminuer la vitesse de leur point d'application; elles sont directement opposées au

mouvement de ce point, ou bien leur direction fait un angle obtus avec la direction de ce mouvement. Les premières se nomment *forces motrices*; et les dernières, *forces résistantes*.

Ce que nous avons souvent désigné jusqu'à présent sous le nom de puissance, n'est autre chose qu'une force motrice; au contraire, les résistances vaincues à l'aide des machines que nous avons étudiées rentrent toutes dans ce que nous nommons maintenant forces résistantes. Dans l'opération décrite au § 64, qui consiste à faire descendre un tonneau le long d'un plan incliné, le poids du tonneau est une force motrice; les forces développées par les hommes qui tiennent les cordes sont des forces résistantes. Si les hommes, en tirant les cordes, faisaient remonter le tonneau, les forces de traction deviendraient des forces motrices, et le poids du tonneau serait une force résistante.

Le travail développé par une force motrice se nomme *travail moteur*; celui qui est développé par une force résistante prend le nom de *travail résistant*.

§ 80. **Égalité du travail moteur et du travail résistant.** — D'après ce qu'on vient de dire, la proposition à laquelle on a été conduit dans le § 76 pourra s'énoncer ainsi : *Lorsque deux forces se font équilibre sur une machine en mouvement, le travail moteur produit pendant un temps quelconque est égal au travail résistant produit pendant le même temps.*

Si une machine est animée d'un mouvement uniforme, et qu'elle soit soumise à l'action d'une seule force motrice et de plusieurs forces résistantes, la force motrice devra faire, à elle seule, équilibre à toutes les résistances. On peut imaginer que cette puissance unique soit décomposée en plusieurs puissances partielles, appliquées au même point, suivant la même direction, et dont chacune fasse séparément équilibre à une des résistances. Dans chacun des groupes partiels, ainsi formés d'une portion de la puissance et d'une des résistances, on trouvera que le travail moteur est égal au travail résistant: donc, en réunissant toutes les quantités de travail correspondant à ces divers groupes, on reconnaîtra que la somme des travaux moteurs développés par les diverses portions de la puissance, ou, ce qui est évidemment la même chose, le travail moteur développé par la puissance tout entière, est égal à la somme des travaux résistants produits par les diverses résistances.

S'il y a plusieurs forces motrices et plusieurs forces résistantes, appliquées à la fois à une machine animée d'un mouvement uniforme, toutes ces forces se neutraliseront encore mutuellement. Chacune

CTION DU MOUVEMENT PAR LES FORCES. 91

pourra être regardée comme faisant équilibre à une stances , et le travail moteur qu'elle produira sera e des travaux résistants produits par la portion des quelle elle fait équilibre. Donc, en réunissant toutes travail, tant moteur que résistant, on trouvera que travaux moteurs développés par les diverses forces gale à la somme des travaux résistants développés résistances.

es travaux moteurs produits par les diverses forces r une machine s'appelle, par abréviation, le *travail* en est de même pour la somme des travaux résis- qu'on peut dire en général : *Lorsqu'une machine est on d'un nombre quelconque de forces, et que son mou- orme , le travail moteur total , correspondant à un ps quelconque , est égal au travail résistant total u même intervalle de temps.*

tion, d'une extrême importance pour l'étude des ma- e regardée comme renfermant en elle tout ce que sur les machines considérées à l'état de mouvement e devra jamais la perdre de vue, si l'on ne veut pas ber dans de graves erreurs.

I ET MODIFICATION DU MOUVEMENT PAR LES FORCES.

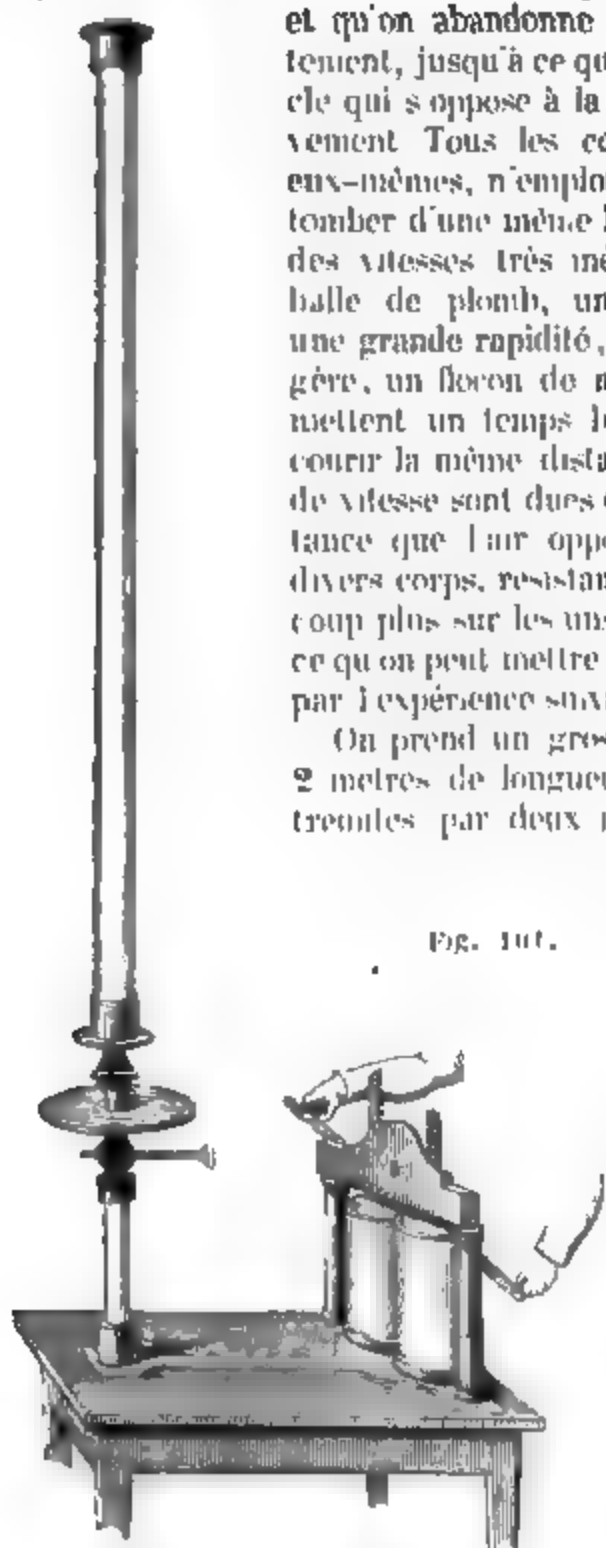
u'une machine ne se meut pas uniformément, les nt appliquées ne se font plus équilibre. Elles peuvent ser en partie ; mais il est nécessaire que les forces ortent sur les résistances, ou, réciproquement, que soient trop grandes pour être équilibrées par les : car, sans cela, il n'existerait aucune cause qui pût ivement de la machine, et ce mouvement resterait se rendre bien compte de l'influence que le défaut forces appliquées à une machine peut avoir sur son faut connaître les lois d'après lesquelles les forces odifient le mouvement des corps sur lesquels elles allons nous occuper de l'étude de ces lois. Pour cela ns le mouvement des corps qui tombent librement la pesanteur, et nous étendrons, par analogie, les ous aurons obtenus à l'action de toutes les autres

§ 82 Chute des corps. — Un corps qu'on tien

et qu'on abandonne ensuite, tombe, jusqu'à ce qu'il ait rencontré ce qui s'oppose à la continuation. Tous les corps, ainsi eux-mêmes, n'emploient pas le même temps pour tomber d'une même hauteur : il y a des vitesses très inégales. C'est une balle de plomb, une pierre, une grande rapidité, tandis qu'une plume, un flocon de neige, une feuille de papier, mettent un temps beaucoup plus long pour parcourir la même distance. Mais ces différences de vitesse sont dues exclusivement à la résistance que l'air oppose au mouvement des divers corps, résistance qui se fait beaucoup plus sur les uns que sur les autres. Ce qu'on peut mettre complètement en évidence par l'expérience suivante.

On prend un gros tube de verre de 2 mètres de longueur, fermé à l'une des extrémités par deux montures de ces

Fig. 101.



de ces est un net qui comme l'intérieur d'une bouteille à l'épreuve d'air. On le tube de divers matériaux tels que du bois, du plomb, du verre, etc. On y met des balles, des plumes, etc. On le ferme à l'une des extrémités, on le met au centre

d'une machine pneumatique, fig. 101 : on ouvre

l'air contenu dans l'intérieur du tube, en manœuvrant le robinet (nous verrons plus tard en quoi consiste cette manœuvre). Lorsqu'il ne reste plus dans le tube qu'une quantité d'air insignifiante, on dévisse le tube, puis on le retourne brusquement pour le mettre dans la position indiquée par la *fig. 102*. Les corps, qui se trouvaient au bas du tube dans la première position, sont ainsi portés à la partie supérieure de l'espace où se trouve le vide, et on les voit tomber tous ensemble de la même manière : partis ensemble de l'une des extrémités du tube, ils arrivent ensemble à l'autre extrémité. Mais si l'on ouvre un peu le robinet pour laisser rentrer une petite quantité d'air, on le referme presque aussitôt, et qu'on retourne brusquement le tube, le phénomène a déjà changé ; les corps de plomb arrivent les premiers en bas, et les corps plus légers y arrivent ensuite, les uns après les autres, suivant qu'ils ont été plus ou moins retardés par l'air qu'on a laissé rentrer. Le retard sera d'autant plus marqué que l'on laissera rentrer plus d'air, et le phénomène aura toute son intensité lorsque le robinet sera maintenu ouvert.

On tire de cette expérience que tous les corps tombent avec la même rapidité dans le vide. La résistance que leur fait l'air, lorsqu'ils tombent dans l'air, la résistance qu'ils en éprouvent est la seule cause qui fait qu'ils tombent avec des vitesses très différentes. On verra même, plus tard, que l'air est la seule cause qui fait que certains corps, comme les ballons, les nuages, la fumée, ne tombent pas, mais qu'ils sont soustraits à l'action de la pesanteur, et qu'ils restent au lieu de tomber ; sans la résistance de l'air, les ballons, les nuages, la fumée, tomberaient avec la même rapidité qu'une pierre ou une balle.



Fig. 102.

Pour étudier ce qui, dans la chute d'un corps, est dû uniquement à la pesanteur, il serait bon d'observer cette chute dans le vide d'air ; mais, comme l'expérience serait difficile à faire, d'un autre côté, l'effet de la résistance de l'air est

extrêmement faible, lorsqu'elle s'exerce sur des corps qui, sous une petite surface, ont un poids un peu grand, on se contente d'observer le mouvement que de pareils corps prennent dans l'air.

§ 83. **Plan incliné de Galilée.** — Si l'on pense à la rapidité avec laquelle tombe une balle de plomb, on reconnaîtra qu'il est, pour ainsi dire, impossible d'observer les espaces qu'elle parcourt pendant les secondes successives qui s'écoulent depuis le commencement de sa chute. Ce qu'on ne peut pas faire d'une manière directe, on le fait en employant des moyens détournés. Nous allons voir d'abord en quoi consiste le moyen dont Galilée s'est servi pour découvrir les lois de la chute des corps, lois qui étaient inconnues avant lui (cette découverte date de l'an 1600 environ).

Nous avons vu dans le § 63 (page 69) que, lorsqu'un corps pesant est posé sur un plan incliné, son poids se décompose en deux forces, dont l'une est dirigée perpendiculairement au plan, et l'autre parallèlement à ce plan. La première composante ne tend qu'à appuyer le corps sur le plan, sans agir en aucune manière pour le faire mouvoir dans un sens plutôt que dans l'autre. La deuxième composante, au contraire, qui est dirigée parallèlement au plan, peut produire tout son effet, et elle fera descendre le corps le long du plan, si elle n'est pas détruite par une force qui lui soit égale et directement opposée. Le rapport de cette composante au poids total du corps est le même que celui de la hauteur du plan incliné à sa longueur (§ 63) : le corps, pouvant céder librement à l'action de cette composante, se mouvra donc exactement de la même manière que s'il tombait verticalement, et que l'intensité de la pesanteur eût été diminuée dans le rapport de la longueur du plan incliné à sa hauteur. Ainsi, en se servant d'un plan incliné dont la hauteur soit dix fois plus petite que sa longueur, on observera un mouvement tout à fait pareil à celui que prendraient les corps en tombant librement, si la pesanteur était dix fois plus petite qu'elle n'est réellement.

Ce moyen ingénieux de diminuer, pour ainsi dire à volonté, l'intensité de la pesanteur, et de diminuer en conséquence la rapidité du mouvement qu'elle occasionne, a été réalisé par Galilée de la manière suivante : Une corde bien unie, de 10 à 12 mètres de longueur, était fortement tendue entre deux points A et B, dont le premier était plus élevé que le second, *fig.* 103 ; deux petites poulies métalliques C, unies par une même chape, étaient posées sur la corde, et un petit poids, suspendu à cette chape, les empêchait de tomber d'un côté ou de l'autre. Les poulies, la chape et le poids *formaient une espèce de petit chariot*, pouvant descendre le long

corde, sans éprouver de résistance bien sensible ; et il était facile d'observer

à l'écart que
double par-
ait pen-
la 1^{re}, la
à 3^e se-
e, à par-
du com-
ement de
mouve-

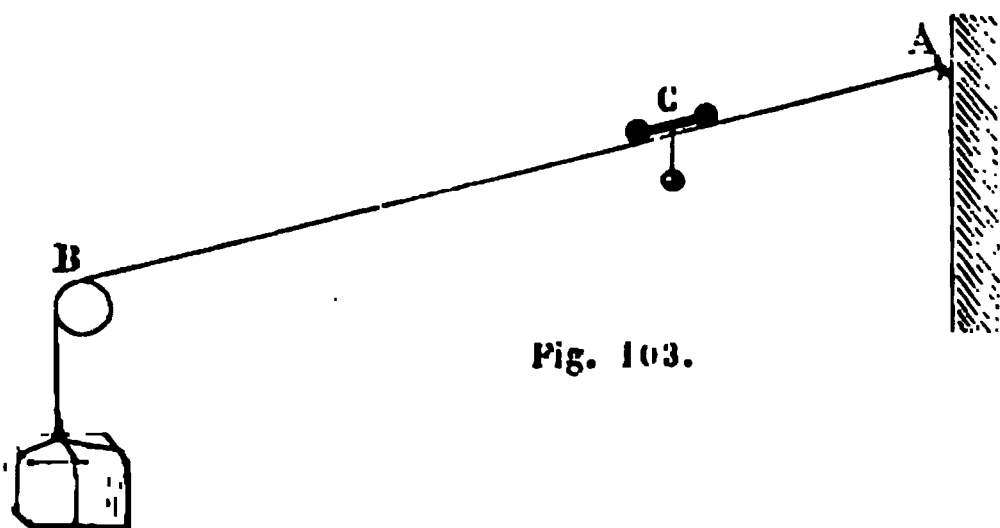


Fig. 103.

14. Machine d'Atwood. — Atwood, physicien anglais, a imaginé, pour observer les lois de la chute des corps, une machine plus commode que le plan incliné de Galilée. Voici en quoi elle consiste.

Un fil de soie très délié passe dans la gorge d'une poulie extrêmement mobile, qu'on aperçoit à la partie supérieure de la machine, et supporte, à ses deux extrémités, deux corps de même poids.

La mobilité de la poulie est obtenue par un mode particulier de suspension de son axe, qui repose sur les circonférences de deux roues placées, deux en avant, deux en arrière (nous reviendrons plus tard sur ce mode de suspension). Les deux corps attachés aux bouts du fil ayant exactement le même poids, la poulie reste immobile. Puisque les deux forces qui lui sont appliquées se balancent : mais, si l'on vient à ajouter un petit poids d'un côté, l'équilibre sera troublé, et le fil se mettra en mouvement, en faisant tourner la poulie. Supposons, pour fixer les idées, que les deux corps suspendus primitivement aux deux extrémités du fil pèsent chacun 4⁹ $\frac{1}{2}$, et que le poids additionnel qui détermine le mouvement soit de 1^{re}. Qu'il y ait équilibre ou mouvement, les poids des deux premiers corps se neutralisent toujours, par l'intermédiaire de la poulie, la force de 1^{re} produit seule le mouvement des trois corps qui pèsent ensemble 10^{re} : ce mouvement sera donc le même que si les trois corps tombaient librement, et que l'intensité de la pesanteur ait été rendue dix fois plus petite. Si les poids des deux premiers corps étaient de 49^{re} $\frac{1}{2}$ chacun, et que le poids additionnel soit toujours de 1^{re}, on reconnaîtrait encore que le mouvement serait le même que si les trois corps tombaient librement, et que l'intensité de la pesanteur ait été rendue cent fois plus petite.

On voit, par là, que la machine d'Atwood permet, tout aussi bien que le plan incliné, de diminuer à volonté le mouvement

96 PRODUCTION DU MOUVEMENT PAR LES FORCES.

des corps qui tombent, sans altérer pour cela les lois de mouvement.

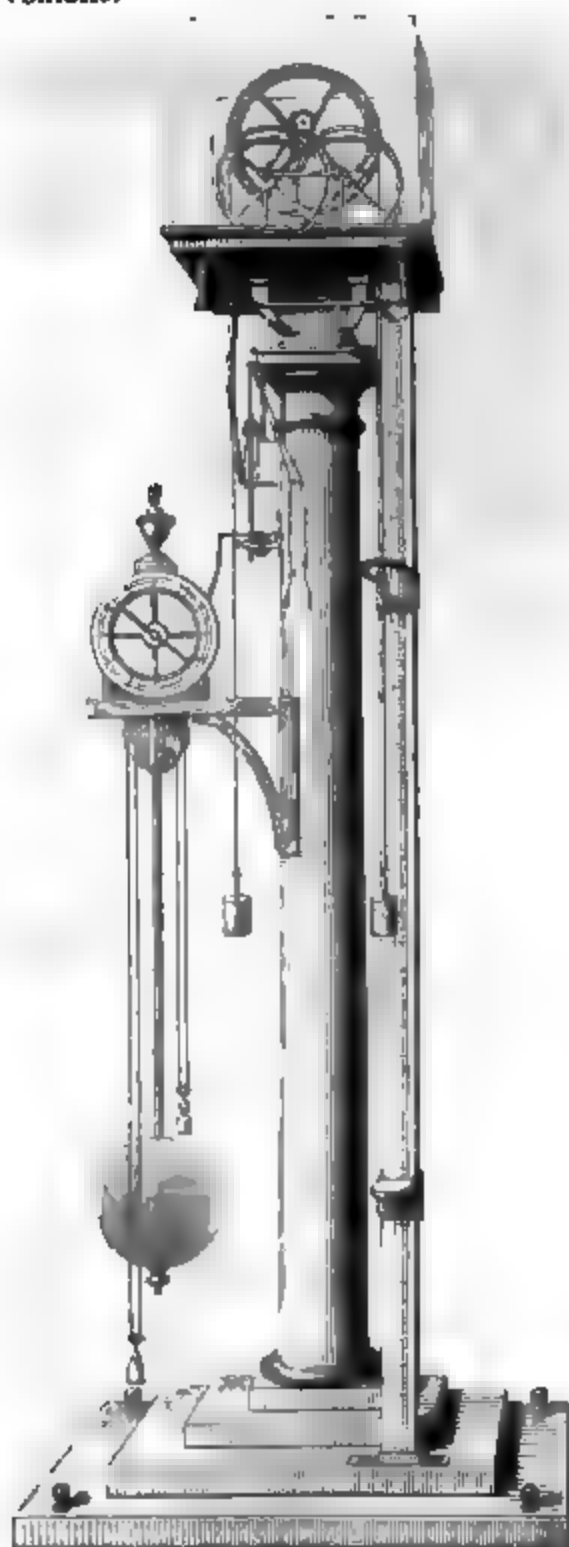


Fig. 101.

Afin de pouvoir étudier facilement les lois du mouvement qui est produit par le poids additionnel, on a disposé une règle verticale dans le voisinage de laquelle parcourt l'un des corps en descendant. Cette règle est divisée en centimètres, et munie de deux curseurs, dont chacun peut être fixé en un quelconque des points, à l'aide d'une vis de pression. L'un des curseurs, représenté par la fig. 105, porte un disque



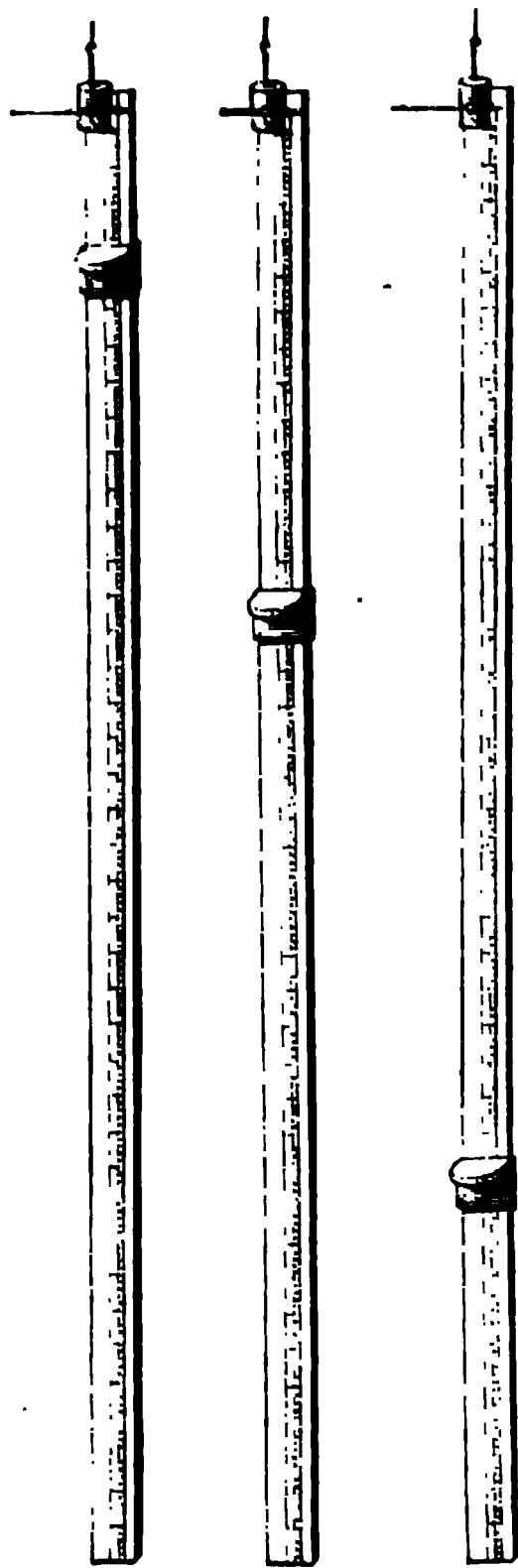
Fig. 105. Fig. 106.

qui est destiné à arrêter le mouvement du corps en descendant. L'autre, représenté par la fig. 106, porte un anneau destiné à laisser passer le corps, mais à arrêter le mouvement au même temps le poids additionnel, qui est alors en effet. Ce poids additionnel présente en son milieu une petite ouverture circulaire et une fente latérale

On fait passer le fil lorsqu'on veut le poser sur l'un des : c'est ce que montre la *fig. 105*, où le corps et le poids se meuvent ensemble. Lorsque le corps et le poids additionnent à rencontrer l'anneau, *fig. 106*, le corps principal et continue son mouvement : mais le poids additionnel et repose par ses extrémités sur les bords de l'anneau. Le mécanisme d'horlogerie, fixé à la colonne de la machine, sert le temps. Il fait mouvoir une aiguille sur un cadran, et lui fait tracer une division en une seconde : en outre, il fait entendre un bruit bien net au commencement de chaque seconde, de sorte qu'on peut compter les secondes qui s'écoulent depuis le commencement d'une expérience, sans avoir besoin de regarder le cadran. On voit que les corps suspendus aux extrémités du fil se meuvent bien exactement au commencement d'une des divisions. La marque du mécanisme d'horlogerie, c'est ce mécanisme qui détermine le commencement du mouvement. À cet effet, le poids qui porte le poids additionnel, et qui, en descendant, parcourt le long de la règle divisée, est soutenu par l'extrémité d'un doigt métallique : ce doigt, mobile autour d'un axe, est maintenu au-dessous du corps par un assemblage complexe, dans le détail desquelles nous n'entrerons pas : mais, lorsque l'aiguille du mécanisme d'horlogerie arrive à la division du cadran, qui est verticalement au-dessus de son centre, elle s'abaisse brusquement, et le mouvement du corps commence à produire. Il est clair que, pour la commodité des observations, le zéro de la graduation de la règle divisée doit être au commencement de la partie inférieure du corps, lorsqu'il est maintenu immobile par le doigt dont on vient de parler.

Lois de la chute des corps. — Une première expérience, à l'aide de la machine d'Atwood, consiste à observer les espaces parcourus par les corps mobiles, pendant une seconde, deux, trois secondes..., à partir du commencement de leur chute. Pour cela on place le curseur à disque plein de manière que la face supérieure se trouve de 16 centimètres au-dessous de la règle divisée, *fig. 107* : puis on cherche, par le tâtonnement, quelle doit être la grandeur du poids additionnel, pour que le corps, lorsqu'il est soutenu par le doigt, parcourt ces 16 centimètres en une seconde : on le reconnaît à ce que le corps, au commencement d'une seconde, vient choquer le disque du commencement de la seconde suivante. On laisse ensuite le curseur, jusqu'à ce qu'il soit à 64 centimètres de-sous du zéro, *fig. 108*, et l'on voit que le corps, mis

en mouvement par le même poids additionnel, en
condes à aller de son point de départ au point où le



En abaissant encore le
nière à l'amener à 1^m, 4
109, et recommençant l
voit que trois secondes
par le corps pour parcou
velle distance.

Ainsi, d'après ces e
en 1^s, le corps parcou
en 2^s, il parcou
à-dire 4 fois plus :
en 3^s, il parcou
à-dire 9 fois plus.

Il en résulte que *les esp*
par un corps qui tombe
l'action de la pesanteur
depuis son point de déj
eur comme les carrés
ployés par le corps à
On voit par là que nou
son, dans le § 12, de c
vement d'un corps qui
exemple du mouvemen
les espaces qu'il parcou
proportionnels aux ten
les parcourir.

§ 86. Nous avons i
même paragraphe, ce
la vitesse dans un mou
un moment déterminé :
qu'on devait entendre
du mouvement uniform
rait, si, à partir du mon
sidère, le mouvement

Fig. 107. Fig. 108. Fig. 109.

modifier. La machine d'Atwood permet, comme
voir, de réaliser ce que suppose cette définition
deux corps, suspendus aux deux extrémités du
mouvement par un poids additionnel, l'action in
poids accélère constamment le mouvement. Mais
descend, et sur lequel est posé le poids additionnel
contrer le curseur à anneau, il continue son chemi

andis que le poids additionnel est arrêté, comme le
 7. 106 Dès lors les deux corps se meuvent seulement
 à leur vitesse acquise: leur poids se faisant équilibre
 nt, aucune force ne tend à modifier leur mouvement,
 iséquent, est uniforme.

ntité du mouvement ainsi obtenu peut
 e de la manière suivante. On prend
 corps suspendus au fil, et le même
 ionnel quo dans le paragraphe qui
 place le curseur à anneau de ma-
 ter le poids additionnel, lorsque le
 descend à parcourir une distance de
 res: et enfin, on dispose le curseur à
 manière que sa face supérieure soit à
 tres du zéro, ainsi que le montre la
 produisant le mouvement, par l'in-
 du mécanisme d'horlogerie, on voit
 d'une seconde le poids additionnel
 et qu'au bout de deux secondes le
 continué à descendre vient choquer
 Si l'on recommence ensuite l'expé-
 e cette seule différence que le cur-
 que soit abaissé jusqu'à 80 centi-
 zéro, comme le montre la *fig. 111*,
 l s'écoule encore une seconde, depuis
 rement du mouvement jusqu'au mo-
 anneau arrête le poids additionnel;
 corps, qui continue à descendre, met
 des à aller de l'anneau au disque.
 e que le corps qui descend, après
 le poids additionnel sur l'anneau,
 2 centimètres en une seconde, et 64
 ondes: ce qui vérifie l'uniformité de
 nent.

uver la vitesse que possède le corps
 l sous l'action du poids additionnel,
 econde, deux secondes, trois secon-
 te, il suffit donc de placer le cur-
 eau de telle manière qu'il arrête le
 onnel après une seconde, deux secondes, trois secondes,
commencement du mouvement: puis de déterminer
arcouru pendant une seconde, après que le mouve-

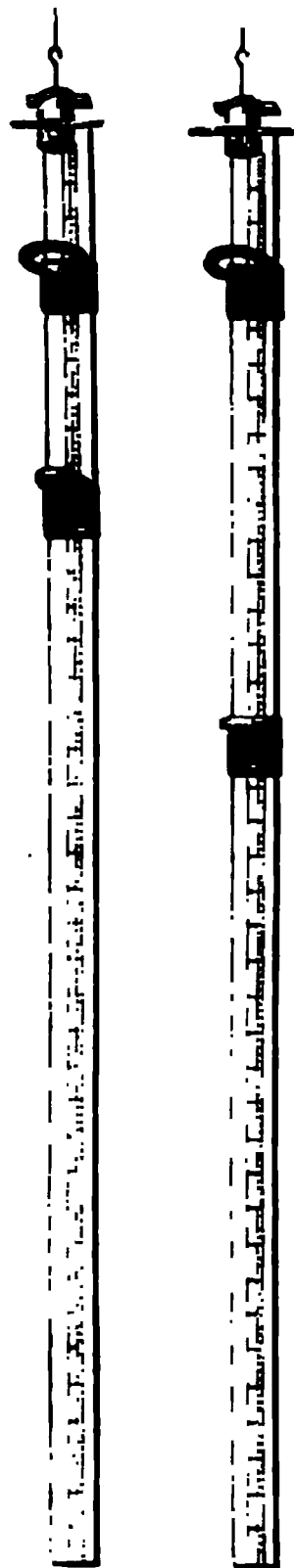


Fig. 110. Fig. 111.

ment a été ainsi rendu uniforme. L'expérience peut se faire de la manière suivante. On place d'abord l'anneau à 46 centimètres du zéro, et le disque à 48 centimètres, *fig. 442*; et l'on voit au bout d'une seconde le poids additionnel en

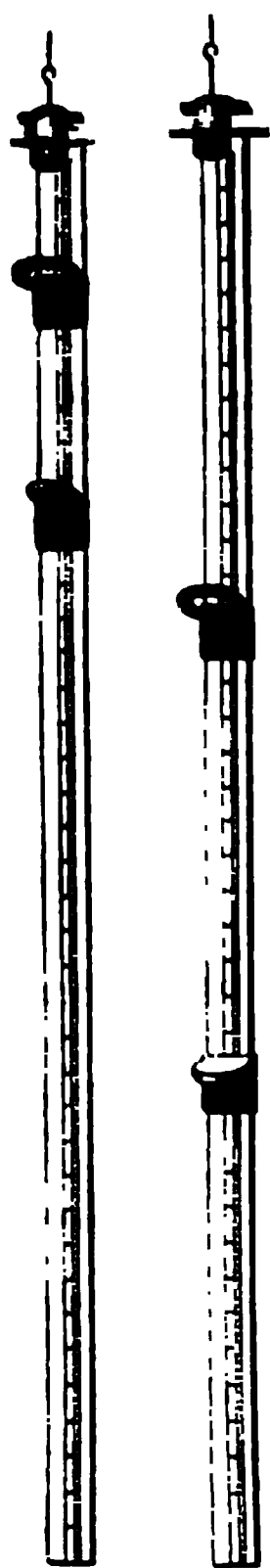


Fig. 112. Fig. 113.

par l'anneau, et qu'au bout de deux secondes le poids vient choquer le disque : la vitesse acquise après une seconde de chute, est donc de 32 mètres par seconde. Puis on descend l'anneau à 64 centimètres du zéro, et le disque à 48 centimètres du même point, *fig. 443*; le même effet étant produit, l'anneau arrête le poids additionnel au bout de deux secondes, et le disque choque le disque une seconde après, c'est-à-dire au bout de trois secondes : la vitesse acquise au bout de deux secondes de chute, est donc de 64 mètres par seconde. Il résulte évidemment que la vitesse acquise à un moment quelconque par un corps qui tombe librement sous l'action de la pesanteur, est proportionnelle au temps qui s'est écoulé depuis le commencement du mouvement.

C'est cette proportionnalité entre le temps écoulés et les vitesses acquises à la fin de ce temps, qui a fait donner au mouvement d'un corps qui tombe, et à tout mouvement uniformément accéléré, le nom de *mouvement uniformément accéléré*.

Si nous observons, de plus, que le corps a parcouru avec le poids additionnel une distance de 46 centimètres dans la première seconde, possède à la fin de ce temps une vitesse de 32 centimètres par seconde, nous en déduisons cette autre loi : *La vitesse acquise par un corps qui tombe, après une seconde de chute, est double de l'espace qu'il a parcouru pendant cette seconde.*

§ 87. Les lois que nous venons de trouver, à l'aide de la méthode d'Atwood, peuvent être représentées par des formules algébriques très simples, qui sont d'un fréquent usage.

Désignons par la lettre g la vitesse acquise par un corps qui tombe librement sous l'action de la pesanteur, après la première seconde de sa chute. D'après ce que nous venons de voir, après

hute, la vitesse acquise sera $2g$; après trois secondes elle sera $3g$;.... donc, après t secondes de chute, elle si nous appelons v cette vitesse acquise, nous aurons la

$$v = gt.$$

in parcouru pendant la première seconde de la chute itié de la vitesse acquise au bout de cette seconde, sera par $\frac{1}{2}g$. En vertu de la première des lois que nous avons chemin parcouru pendant les deux premières secondes $\frac{1}{2}g$; le chemin parcouru pendant les trois premières secondes 9 fois $\frac{1}{2}g$;.... donc le chemin parcouru pendant les t secondes sera $\frac{1}{2}gt^2$, et si nous désignons ce chemin par ons cette autre formule

$$h = \frac{1}{2}gt^2.$$

i nous observons que, de notre première formule, nous $v^2 = g^2 t^2$; et que la seconde nous donne $t^2 = \frac{2h}{g}$, nous ons

$$v^2 = 2gh, \text{ ou bien } v = \sqrt{2gh}.$$

nière formule servira à trouver la vitesse qu'acquerrait a tombant d'une hauteur donnée. Elle nous sera utile is nous occuperons du mouvement des liquides et des

our qu'on puisse se servir des formules qui précèdent, il ire de connaître la valeur de la lettre g : on pourra la de la manière suivante. On laissera tomber une pierre, ne balle de plomb, du haut d'une tour dont on connaîtra et l'on comptera, à l'aide d'une montre, le nombre de ue ce corps mettra à parcourir toute cette hauteur: on ensuite, dans la formule $h = \frac{1}{2}gt^2$, h par la hauteur de rimée en mètres, et t par le nombre de secondes qu'on i, et l'on en déduira la valeur de g .

n n'est pas très exact, à cause de la rapidité de la chute aussi n'est-ce pas celui qu'on emploie réellement, et ne vir qu'à donner une idée grossière de la valeur de g . ns bientôt comment cette valeur se détermine avec une ctitude par les observations du pendule: mais nous adop-édiatement le résultat que ces observations fournissent, nettrons qu'on a

$$g = 9^m,8088.$$

int de cette valeur de g , et se servant de la formule , on peut calculer la vitesse que possède un corps qu

est tombé d'une hauteur donnée, ou bien ce qu'on appelle simplement la *vitesse due à cette hauteur*. Le tableau suivant contient les résultats fournis par ce calcul, et correspondant à un grand nombre de valeurs de la hauteur de chute.

| HAUTEUR
de chute. | VITESSE
acquise. | HAUTEUR
de chute. | VITESSE
acquise. |
|----------------------|---------------------|----------------------|---------------------|
| m | m | m | m |
| 0,25 | 2,214 | 44 | 46,572 |
| 0,50 | 3,132 | 45 | 47,151 |
| 1 | 4,429 | 46 | 47,717 |
| 2 | 6,264 | 47 | 48,262 |
| 3 | 7,672 | 48 | 48,791 |
| 4 | 8,858 | 49 | 49,306 |
| 5 | 9,904 | 50 | 49,808 |
| 6 | 10,849 | 60 | 54,260 |
| 7 | 11,718 | 70 | 58,013 |
| 8 | 12,528 | 80 | 61,319 |
| 9 | 13,288 | 90 | 64,308 |
| 10 | 14,006 | 100 | 67,057 |
| 11 | 14,690 | | 69,616 |
| 12 | 15,343 | | 72,019 |
| 13 | 15,970 | | 74,292 |

§ 89. Lorsqu'un corps pesant est lancé verticalement et de bas en haut, il monte jusqu'à une hauteur plus ou moins grande, suivant la grandeur de la vitesse d'impulsion qui lui a été imprimée. A mesure qu'il s'élève, sa vitesse va en diminuant : bientôt elle s'annule complètement, le corps s'arrête un instant, puis il redescend en parcourant le même chemin, avec des vitesses qui vont constamment en augmentant. Au moment où, en descendant, il repasse par le point d'ou il est parti, il a repris exactement la vitesse qui lui avait été donnée lorsqu'on l'avait lancé : c'est ce qu'on démontre à l'aide de l'expérience suivante

Imaginons qu'on ait adapté à la règle de la machine d'Atwood deux curseurs à anneaux, tellement disposés que l'un de ces anneaux puisse être traversé par le corps suspendu à l'une des extrémités du *fil*, et que l'autre puisse l'être également par le corps suspendu à

extrémité, *fig. 114* et *115*. Pour déterminer le mouvement des corps, on place un poids additionnel sur celui de droite, et sous l'action de ce poids, *fig. 114*; mais en même temps le corps monte, et au moment où le premier, en traversant l'anneau de droite, abandonne son poids additionnel, le second en

est exactement de même poids, qui a été dis-
 tance sur l'anneau de gauche, *fig. 115*. Le mouvement continue en même la vitesse acquise; tandis qu'il s'accélé-
 re sous l'action du poids additionnel, il s'agit de plus en plus l'action du second, qui est dans les mêmes conditions qu'un corps pesant de bas en haut. Les corps se meuvent toujours dans le même sens qu'à ce que leur mouvement soit complètement arrêté par la résistance du second poids. Alors, après un arrêt, ils reprennent leur mouvement en sens contraire; le poids de gauche descend d'un mouvement accéléré, et abandonne bientôt son poids additionnel sur l'anneau qu'il

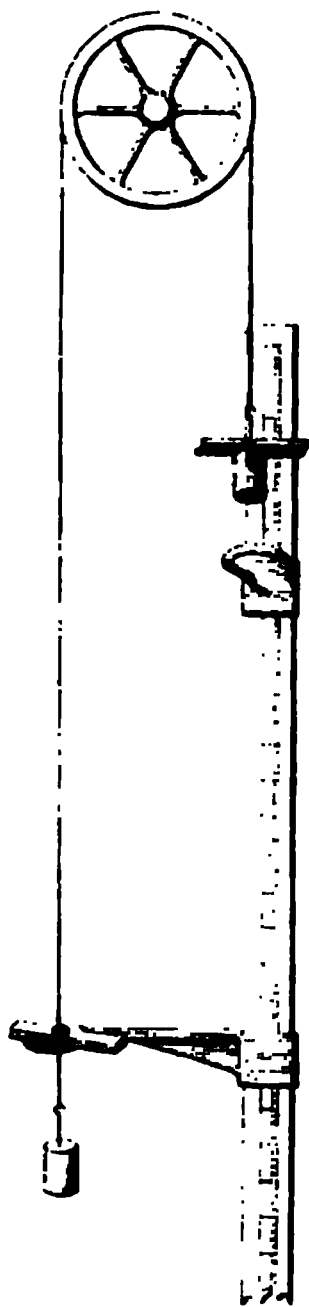


Fig. 114.

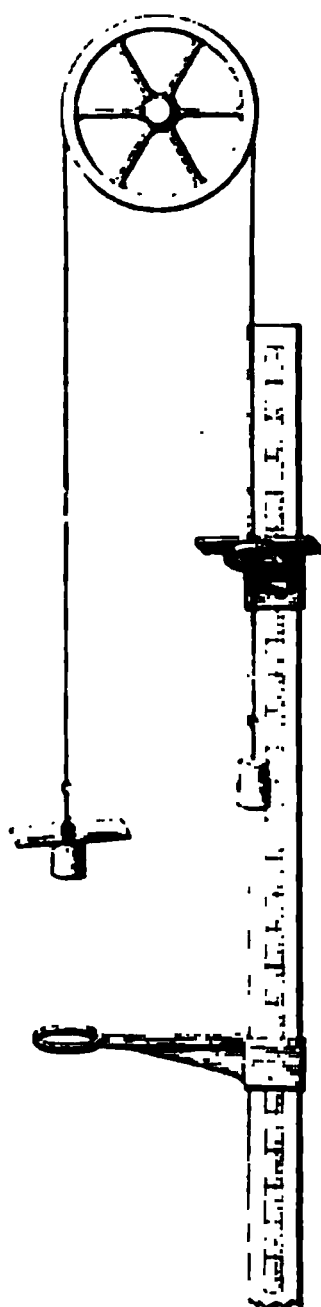


Fig. 115.

le poids de droite reprend, en même temps, celui qu'il a donné en descendant: le mouvement se ralentit de nouveau, puis recommence en sens contraire: et ainsi de

voilà que le poids additionnel de droite est abandonné, en descendant l'anneau qui lui correspond, il possède une certaine vitesse produite par l'action de la pesanteur sur ce poids, depuis le moment où il a commencé à descendre, et qui dépend de la distance de sa chute. Mais, en même temps, le corps de gauche,

qui monte avec une vitesse égale, saisit l'autre poids additionnel et lui communique instantanément la même vitesse : ce second poids additionnel se trouve donc lancé de bas en haut avec la vitesse que le premier avait acquise en tombant. Or, on observe la hauteur à laquelle le second s'élève, en vertu de sa vitesse d'impulsion, est égale à celle dont le premier était tombé : en sorte que lorsque ce second poids, qui se trouve dans les mêmes conditions que l'autre, sera redescendu de cette hauteur, il aura acquis haut en bas la vitesse avec laquelle il avait commencé à se mouvoir de bas en haut : c'est ce qui confirme bien la proposition énoncée il y a un instant.

Ainsi, le tableau contenu dans le § 38 peut donner une idée de la hauteur à laquelle s'élèvera un corps, d'après la vitesse d'impulsion qu'on lui aura transmise de bas en haut.

§ 90. **Appareil de M. Morin.** — On peut encore étudier les lois de la chute des corps au moyen de l'appareil suivant. M. Morin a indiqué la disposition.

Un cylindre vertical AA, *fig. 146*, est susceptible de tourner sur son axe de figure. Un mécanisme d'horlogerie B, muni d'un poids C, est destiné à lui communiquer un mouvement de rotation uniforme. Nous n'entrerons pas dans le détail des parties qui se composent de ce mécanisme, et nous ne chercherons pas à faire comprendre comment il peut faire tourner uniformément le cylindre : cela supposerait des connaissances que nous ne possédons pas encore. Mais nous nous contenterons de dire que, lorsqu'on laisse le cylindre AA libre de céder à l'action du poids C, son mouvement s'accélère peu à peu pendant quelque temps, puis devient sensiblement uniforme : ce qu'on reconnaît sans peine, à l'aide du petit bruit que fait entendre une lame mince de baleine qui vient rencontrer successivement les quatre bras de la rampe à ailettes adaptée au haut de l'appareil, et animée à chaque révolution d'une vitesse proportionnelle à celle du cylindre AA.

En avant du cylindre AA se trouve suspendu un corps pesant muni d'un crayon dont la pointe appuie légèrement sur la surface du cylindre. Si l'on vient à décrocher ce corps, il tombe le long du cylindre : deux fils métalliques tendus verticalement, et passant dans des œillets adaptés au corps D, le guident dans cette chute et empêchent qu'il ne s'écarte de la verticale par suite de l'action de quelque cause étrangère. Il suffit de tirer une petite ficelle pour décrocher le corps D, et déterminer ainsi sa chute.

Si le cylindre AA ne tournait pas, pendant que le corps D tombe, il est clair que la pointe du crayon qui lui est adapté tracerait une ligne droite.

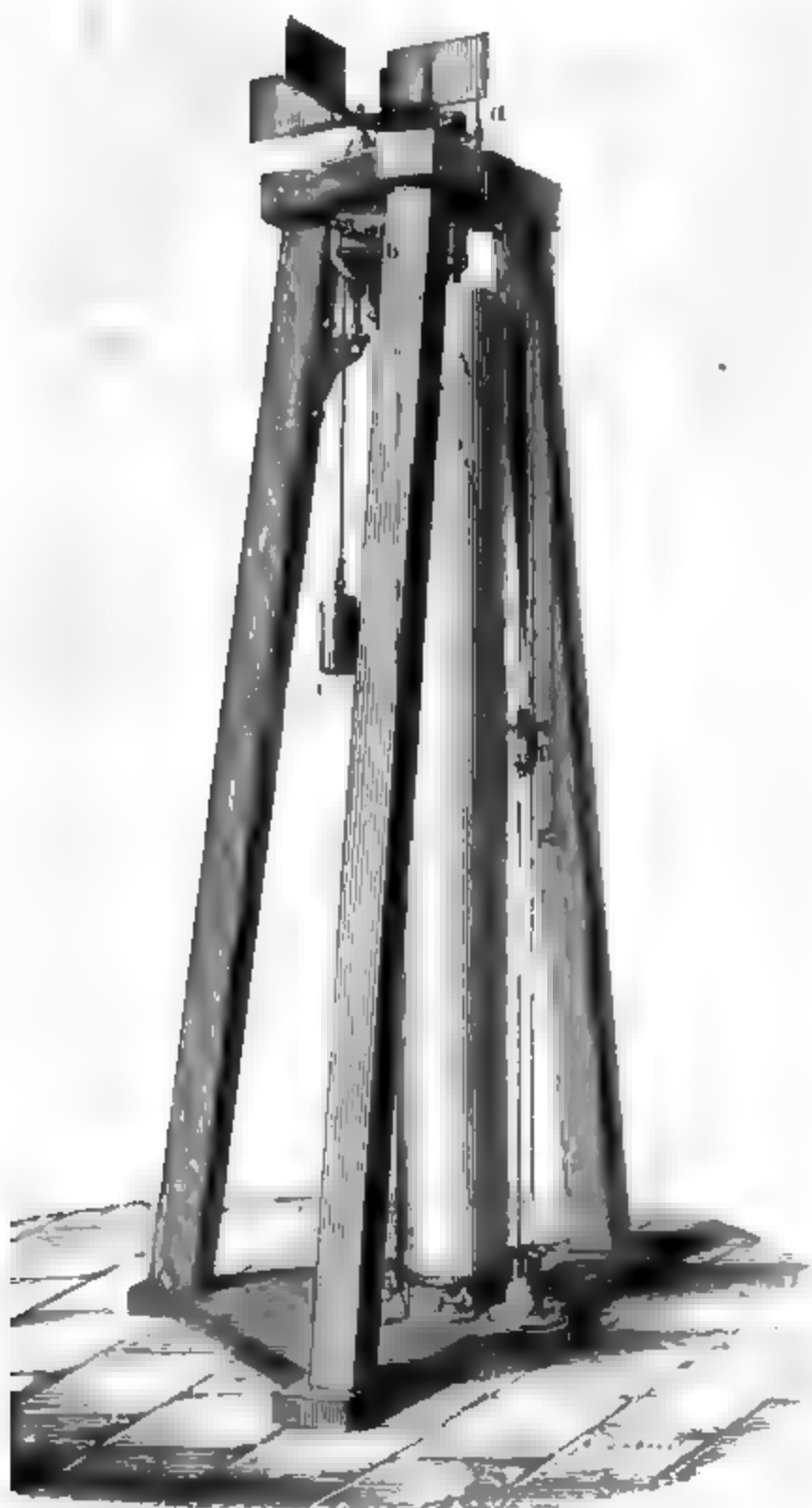


Fig. 110.

le cylindre une simple ligne droite verticale. Lors le cylindre tourne et que le corps D reste immobile, le crayon trace sur la surface du cylindre une circonférence horizontale. Mais si l'on détermine la chute pendant que le cylindre est animé du mouvement uniforme que lui a transmis le poids C, le crayon trace sur la surface du cylindre une ligne essentiellement droite et de la circonférence du cercle dont on a. Cette ligne courbe *mnpq*, fig. 117, dépend évi-

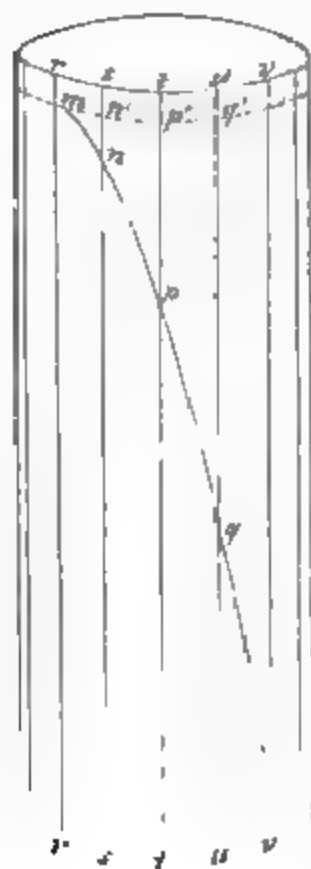


Fig. 117.

du mouvement que le corps D a subi pendant l'action de la pesanteur; et de sa forme doit dépendre cette loi.

Pour faciliter l'étude de la courbe *mnpq*, on trace sur la surface du cylindre, des lignes verticales, distantes *rr*, *ss*, *tt*, *uu*, *vv*. Ces lignes du cylindre sont rencontrées par la courbe *mnpq*, en divers points *m'*, *n'*, *p'*, *q'*, situés à diverses hauteurs. L'instant où le corps D a commencé à tomber, le cylindre ayant tel mouvement, que la génératrice *ss* vienne à coïncider avec la génératrice *rr*, le corps D est à la hauteur *mm'*, et le crayon marque le point *m*. Pendant un nouveau temps égal au précédent, la génératrice *tt* est venue à son tour se placer sous le crayon, qui y a marqué le point *n*. Il est clair, d'après cela, que le corps D a employé à tomber de la hauteur *mm'*, un temps double de celui qu'il a employé à tomber de la hauteur *nn'*; et

le temps qu'il a mis à tomber de la hauteur *qq'* est triple du temps correspondant à *nn'*. Or si l'on mesure les hauteurs *mm'*, *nn'*, *qq'*, on trouve qu'elles sont entre elles comme les carrés du temps, ce qui montre que les espaces parcourus par le corps pendant le commencement de sa chute, sont proportionnels aux carrés des temps employés à les parcourir.

L'appareil dont il s'agit ne se prête pas, aux

Wood, à la recherche directe de la loi des vitesses; il ne donne, comme nous venons de l'expliquer, que la loi des espaces parcourus, mais il permet de vérifier cette loi des espaces avec une précision beaucoup plus grande que celle que comporte l'emploi de cette autre machine.

§ 91. Mode d'action des forces pour produire le mouvement. — Examinons maintenant les lois de la chute des corps, que nous venons de trouver, et voyons les conséquences qu'on en peut tirer, relativement à la manière dont la pesanteur produit le mouvement.

Le chemin parcouru pendant la première seconde de la chute, est la moitié de la vitesse acquise par le corps au bout de cette seconde, sera égal à $4^m,9044$, ou, à très peu près $4^m,9$. La loi de proportionnalité des chemins parcourus aux carrés des temps employés à les parcourir nous conduira donc aux résultats suivants :

| | | |
|--|---------|---------|
| pendant la première seconde, le corps parcourt | | $4^m,9$ |
| pendant les 2 premières secondes. | 4 fois | $4^m,9$ |
| pendant les 3 premières secondes. | 9 fois | $4^m,9$ |
| pendant les 4 premières secondes. | 16 fois | $4^m,9$ |
| pendant les 5 premières secondes | 25 fois | $4^m,9$ |

Etc.

En concluons de là que :

| | | |
|--|--------|---------|
| pendant la 1 ^{re} seconde, le corps parcourt. | | $4^m,9$ |
| pendant la 2 ^e seconde | 3 fois | $4^m,9$ |
| pendant la 3 ^e seconde. | 5 fois | $4^m,9$ |
| pendant la 4 ^e seconde. | 7 fois | $4^m,9$ |
| pendant la 5 ^e seconde. | 9 fois | $4^m,9$ |

Etc.

Observons maintenant qu'en vertu de la loi de proportionnalité des temps écoulés aux vitesses acquises à la fin de ces temps, la vitesse acquise

| | | |
|---|--------|---------|
| au commencement de la 2 ^e seconde est de | 2 fois | $4^m,9$ |
| au commencement de la 3 ^e seconde. | 4 fois | $4^m,9$ |
| au commencement de la 4 ^e seconde | 6 fois | $4^m,9$ |
| au commencement de la 5 ^e seconde. | 8 fois | $4^m,9$ |

Etc.

En rapprochant ces différents résultats, nous pouvons faire les remarques suivantes :

1^{re} Dans la première seconde, la pesanteur fait parcourir au corps $4^m,9$.

2^e Dans la deuxième seconde, si la pesanteur cessait d'agir, le

parcourrait 2 fois $4^m,9$, en vertu de sa vitesse acquise : il parcourt en réalité 3 fois $4^m,9$: donc la pesanteur, en continuant à agir, lui fait parcourir, pendant la deuxième seconde, $4^m,9$ de plus qu'il parcourrait sans cela.

3^e Dans la troisième seconde, si la pesanteur cessait d'agir, il parcourrait 4 fois $4^m,9$, en vertu de sa vitesse acquise : mais il parcourt en réalité 5 fois $4^m,9$: donc la pesanteur, en continuant à agir, lui fait encore parcourir, pendant la troisième seconde, $4^m,9$ de plus qu'il n'aurait parcouru sans cela ; et ainsi de suite.

On peut donc dire, en général, que la pesanteur, en agissant sur un corps qui tombe, lui fait décrire, pendant chaque seconde, $4,9$ de plus que si le corps s'était mû, pendant toute cette seconde, seulement avec la vitesse qu'il avait acquise au commencement.

A la fin de chaque seconde, la vitesse acquise par le corps surpasse de 2 fois $4^m,9$ celle qu'il avait au commencement de cette seconde : on peut donc dire encore que, pendant chaque seconde, quelle que soit la vitesse que possède déjà le corps, la pesanteur lui communique toujours le même accroissement de vitesse.

On doit conclure de tout cela que, *dans le mouvement d'un corps qui tombe librement, la pesanteur agit toujours de la même manière, quelle que soit la vitesse dont le corps est animé.*

Une force, de quelque nature qu'elle soit, peut toujours être assimilée à la force qui provient de l'action de la pesanteur sur un corps : la loi que nous venons de trouver sera donc applicable à cette force, sans aucune modification.

Il semble que, dans certaines circonstances, on observe des faits qui sont en opposition avec cette loi. Si, par-exemple, un tonneau repose sur un sol uni et horizontal, et qu'on le fasse rouler en le poussant avec la main, on pourra lui communiquer un mouvement de plus en plus rapide. Mais on sent qu'au commencement du mouvement on a une plus grande action que plus tard : à mesure que le tonneau va plus vite, on accélère de moins en moins sa vitesse, et il arrive un moment où on ne l'accélère même plus. Pour peu qu'on réfléchisse à ce qui se passe dans ce cas, on reconnaîtra qu'il y a une différence essentielle avec ce qui se produit dans le mouvement d'un corps qui tombe librement. On verra, en effet, que plus le tonneau va vite, plus la pression qu'on peut exercer avec les mains diminue ; et que, s'il a atteint la plus grande vitesse que puisse prendre un homme en courant, il ne sera plus possible de continuer à le pousser pour augmenter encore sa vitesse. L'augmentation de la vitesse du tonneau donne lieu à une diminution dans la

de la force qui agit sur lui, et c'est pour cela que, plus la distance est grande, moins on accélère : mais si la pression exercée par les mains était toujours la même, elle donnerait lieu au même accroissement de vitesse dans une même durée de temps. Le tonneau roulant de plus en plus vite, se soustrait de plus en plus à l'action des mains qui le poussent ; tant qu'il ne se soustrait autant à l'action de la pesanteur.

Les vitesses communiquées à un même corps, par des forces qui agissent pendant des durées égales, sont exactement proportionnelles aux forces. Cette proposition peut être vérifiée de la manière suivante, à l'aide de la machine d'Atwood.

On suspendra d'abord, à deux extrémités du fil, deux corps pesant chacun 240 grammes, et on posera un poids additionnel de 20 grammes sur celui des deux

qui se meut le long de la règle divisée, fig. 118. Ce poids additionnel déterminera le mouvement des deux corps, et on pourra, en opérant comme précédemment, déterminer la vitesse communiquée par ces corps, après une seconde de mouvement.

On remplacera ensuite les deux corps de 240 grammes par deux autres pesant chacun 230 grammes, et le poids additionnel de 20 grammes par un autre de 40 grammes, fig. 119 ; puis on détermi-

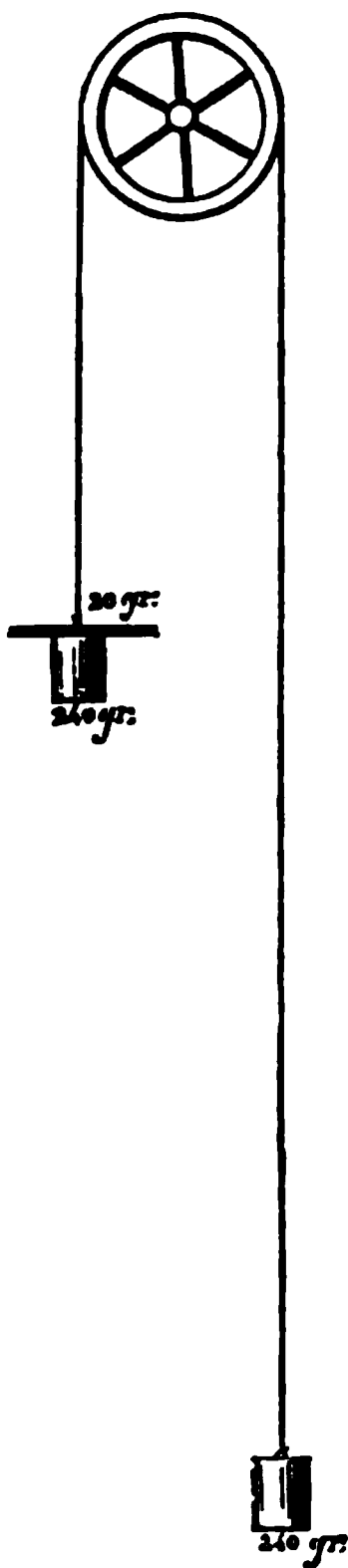


Fig. 118.

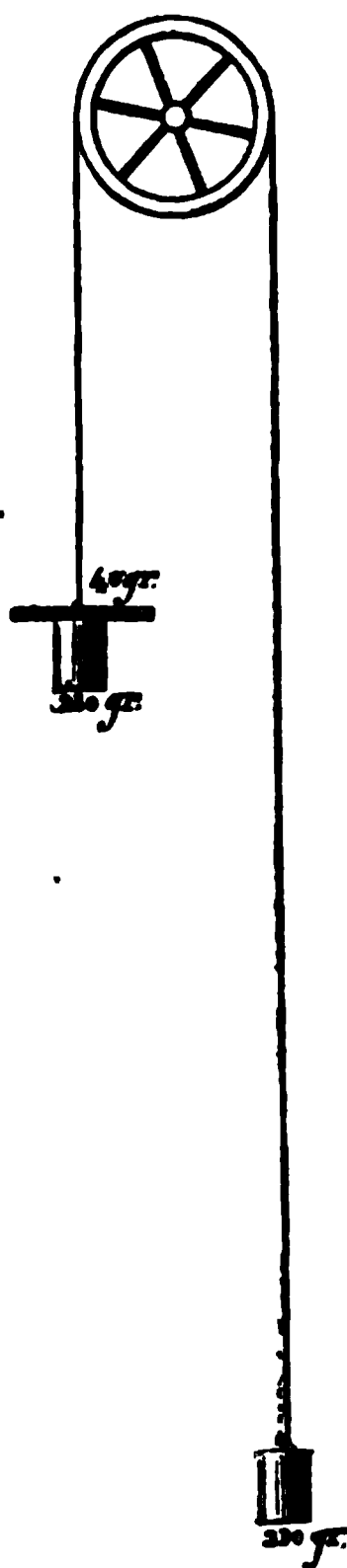


Fig. 119.

nera encore la vitesse acquise par les corps, sous l'action de poids additionnel, après une seconde de mouvement.

On voit que, dans chacun des deux cas, l'ensemble des corps qui se meuvent pèse 500 grammes ; on peut donc dire que c'est le même corps qui est mis en mouvement, dans le premier cas, par une force de 20 grammes, et, dans le second, par une force de 40 grammes. Eh bien ! l'expérience montre que la vitesse acquise, après une seconde de mouvement, est deux fois plus grande dans le second cas que dans le premier. Si l'on faisait une troisième expérience, en faisant mouvoir des corps pesant ensemble 500 grammes, par un poids additionnel de 60 grammes, on trouverait de même que la vitesse acquise, après une seconde de mouvement, serait triple de ce qu'elle était dans le premier cas. La proportionnalité des forces aux vitesses qu'elles communiquent à un même corps, sur lequel elles agissent dans les mêmes circonstances, se trouve par là complètement vérifiée.

§ 93. Cette loi permet d'obtenir très facilement la vitesse qu'une force donnée communiquera à un corps, en agissant sur lui d'une manière régulière pendant un temps déterminé ; ou bien, réciproquement, la grandeur de la force capable de communiquer à un corps une vitesse donnée, en agissant sur lui d'une manière régulière pendant un certain temps. Les deux exemples suivants suffiront pour montrer ce qu'on doit faire dans toutes les questions de ce genre.

Première question. — Quelle vitesse une force de 25^k donnera-t-elle à un corps pesant 140^k, en agissant sur lui pendant une seconde, suivant une même direction ? — Si la force était de 140^k, la vitesse communiquée au corps, après une seconde d'action, serait de 9^m,8088 par seconde ; la force étant de 25^k seulement, la vitesse qu'elle donnera au corps sera fournie par la proportion

$$\frac{x}{9^m,8088} = \frac{25}{140}, \quad x = \frac{9^m,8088 \times 25}{140} = 1^m,752.$$

Deuxième question. — Quelle force devra-t-on appliquer à un corps pesant 140^k, pour qu'en agissant sur ce corps pendant une seconde, dans une même direction, elle lui communique une vitesse de 2^m par seconde ? — Si la vitesse devait être de 9^m,8088 par seconde la force serait égale au poids même du corps, c'est-à-dire qu'elle serait de 140^k ; la vitesse devant être de 2^m seulement par seconde la grandeur de la force s'obtiendra à l'aide de la proportion suivante

$$\frac{x}{140^k} = \frac{2}{9,8088}, \quad x = \frac{140^k \times 2}{9,8088} = 28^k,546.$$

§ 94. **Masse d'un corps, quantité de mouvement.** — En résolvant la seconde des deux questions qui précèdent, nous avons trouvé que la force capable de communiquer une vitesse de deux mètres par seconde, à un corps pesant 140^k , en agissant sur lui dans une même direction pendant une seconde, était égale à $\frac{140^k \times 2}{9,8088}$; ou bien, ce qui revient au même, égale à $\frac{140^k}{9,8088} \times 2$. Cette force s'obtient donc en divisant le poids du corps par 9,8088, c'est-à-dire par le nombre que nous avons désigné précédemment par g , et multipliant le quotient par le nombre qui représente la vitesse à communiquer au corps. Ce quotient du poids d'un corps par le nombre g est ce qu'on nomme sa *masse*; en sorte qu'on peut dire que la force capable de donner une certaine vitesse à un corps, en agissant sur lui pendant une seconde, est égale au produit de la masse du corps par la vitesse qui doit lui être communiquée.

Il résulte évidemment de là, que, plus la masse d'un corps est grande, et plus la force qui doit lui communiquer une vitesse donnée est grande; et aussi que, plus la masse d'un corps est grande, plus la vitesse que lui communiquera une force donnée sera petite. On voit donc que la signification du mot *masse*, en mécanique, est bien la même que celle qu'on lui attribue habituellement; on dit, en effet, qu'un corps est plus ou moins massif, que sa masse est plus ou moins grande, suivant qu'on éprouve plus ou moins de difficulté à le soulever, à le déplacer. L'acception vulgaire du mot *masse* se trouve conservée dans la définition que nous en avons donnée; mais ce qu'il y avait de vague dans cette acception a disparu, et le mot *masse* nous représentera désormais quelque chose qui peut se mesurer, qui peut s'évaluer en nombre.

On emploie souvent en mécanique l'expression de *quantité de mouvement*: nous sommes en mesure, dès maintenant, de donner une définition précise de cette expression. On appelle quantité de mouvement d'un corps, le produit qu'on obtient en multipliant sa masse par sa vitesse. C'est ainsi qu'on pourra dire, en raison de ce qui a été trouvé au commencement de ce paragraphe, qu'une force est égale à la quantité de mouvement qu'elle communique à un corps, en agissant sur lui, dans une même direction, pendant une seconde.

§ 95. **Mouvement d'un corps pesant sur un plan incliné.** — Lorsqu'un corps, soumis à la seule action de la pesanteur, se trouve sur un plan incliné, il descend le long de ce plan. Son poids se *décompose*, ainsi que nous l'avons vu au § 63, en une composante *perpendiculaire au plan*, qui ne produit pas d'effet, et une autre

composante parallèle au plan, qui produit seule le mouvement : le rapport de cette dernière composante au poids du corps est le même que le rapport de la hauteur du plan incliné à sa longueur. Cette composante, agissant toujours de la même manière, et dans la même direction, donne au corps un mouvement uniformément accéléré, mais plus lent que celui qu'il prendrait s'il pouvait tomber librement sous l'action de son poids tout entier. Le mouvement ainsi produit présente une circonstance très remarquable : c'est que, quelle que soit l'inclinaison du plan, lorsque le corps, en descendant le long de ce plan, s'est abaissé d'une certaine hauteur mesurée verticalement, il est animé de la même vitesse que s'il était tombé librement de la même hauteur suivant la verticale. Voici comment on peut s'en rendre compte.



Fig. 120.

Supposons que la hauteur AC du plan incliné soit le tiers de sa longueur AB, fig. 120 : la composante du poids du corps, qui est parallèle au plan, et qui détermine seule le mouvement, sera trois fois plus petite que ce poids. La vitesse que le corps aura acquise au bout d'une seconde, sera donc (§ 93) trois fois plus petite que si le corps était tombé librement suivant la verticale ; et, de même, l'espace qu'il parcourra pendant la première seconde de son mouvement, sera trois fois plus petit que l'espace qu'il aurait parcouru dans le même temps, en tombant verticalement. On voit, par là, que si l'on prend AF égal à $4^m,9044$, et AD trois fois plus petit (ce qui pourra se faire en abaissant PD perpendiculaire à AB), le corps, parti du point A, viendra au point D au bout d'une seconde ; tandis que, s'il était tombé suivant la verticale, il se serait trouvé au même moment au point F.

Menons la ligne horizontale DE : le rapport de AE à AD sera le même que celui de AC à AB, c'est-à-dire de 4 à 3. AE est donc égal au tiers de AD ; mais AD est déjà le tiers de AF : donc AE sera le neuvième de AF. La loi de la proportionnalité des espaces parcourus aux carrés des temps employés à les parcourir, nous montre que le corps, en tombant verticalement à partir du point

MOUVEMENT D'UN CORPS PESANT SUR UN PLAN INCLINÉ. 113

A, serait arrivé en **E** au bout d'un tiers de seconde, puisqu'il arrivait en **F** au bout d'une seconde. La vitesse qu'il possèdera en passant au point **E**, sera donc trois fois plus petite que celle qu'il acquerra en arrivant au point **F**; mais déjà nous avons dit que, dans le mouvement sur le plan incliné, la vitesse du corps au point **D**, après une seconde de mouvement, sera trois fois plus petite que la vitesse qu'il aurait au point **F**, après une seconde de chute verticale : donc les vitesses du corps, au point **D**, dans son mouvement sur le plan incliné, et au point **E**, dans le mouvement qu'il prendrait en tombant librement suivant la verticale, sont exactement les mêmes.

Ce que nous venons de dire pour la vitesse acquise par le corps, à la fin de la première seconde, dans son mouvement sur le plan incliné, nous pourrions évidemment le répéter pour la vitesse qu'il acquerrait à tout autre instant. Il en résulte que, si deux corps partent du même point **A**, *fig. 121*, et se meuvent, sous la seule action

de leur poids, l'un sur le plan incliné **AB**, l'autre suivant la verticale **AC**, les vitesses que le premier corps possèdera, lorsqu'il passera aux points **D**, **D'**, **D''**, seront respectivement égales à celles qu'aura le second corps, lorsqu'il passera aux points **E**, **E'**, **E''**, situés sur les mêmes plans horizontaux que les premiers. En sorte qu'on peut conclure généralement de ce qui précède, que la vitesse acquise, à un moment quelconquo, par un corps qui descend le long d'un plan incliné, sous la seule action de son poids, n'est autre chose que la vitesse due à la hauteur dont il s'est abaissé verticalement depuis son point de départ (§ 88).

Si un corps pesant était lancé le long d'un plan incliné **AB**, *fig. 122*, et de bas en haut, comme l'indique la flèche, sa vitesse serait retardée par l'action de son poids, dont une composante tendrait à l'empêcher de monter. La diminution de vitesse qu'il éprouverait, en

montant de **D** en **D'**, serait précisément égale à l'augmentation de vitesse qui lui serait donnée, s'il parcourait le même chemin en sens



Fig. 121.

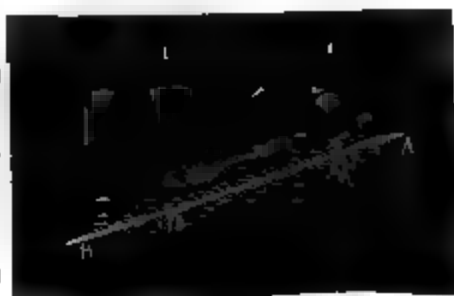


Fig. 122.

contraire. Il en résulte que, si en D il était animé de la vitesse due à la hauteur CD, en D' il n'aurait plus que la vitesse due à la hauteur C'D', les points C et C' étant situés sur une même ligne horizontale.

§ 96. **Mouvement d'un corps pesant sur une ligne courbe.**

— Lorsqu'un corps pesant se meut le long d'une ligne courbe, il acquiert, en descendant, successivement différentes vitesses; nous déterminerons visément ces vitesses, à l'aide de ce que nous venons de voir. Pour cela nous diviserons d'abord la ligne courbe en plusieurs parties AB, BC, CD, ... fig. 123, assez petites pour que chacune d'elles



Fig. 123.

puisse être regardée comme une petite ligne droite, et assimilée en conséquence à un plan incliné, sur lequel le corps est obligé de se mouvoir. Si le corps part du point A, il descendra jusqu'en B, et, arrivé en ce point, il sera animé de la vitesse due à la hauteur BM. Il prendra alors la direction BC, et se trouvera dans les mêmes conditions que s'il se mouvait sur le plan incliné RBC, et qu'il

fût parti du point R : lorsqu'il arrivera au point C, il sera donc animé de la vitesse due à la hauteur CN. En continuant ainsi à suivre le mouvement du corps, sur les diverses parties dans lesquelles nous avons décomposé la courbe, nous trouverons toujours qu'en un point quelconque, il est animé de la vitesse due à la hauteur verticale du point de

départ A au-dessus de ce point.

Il nous sera facile, d'après cela, de nous rendre compte des diverses circonstances que présentera le mouvement d'un corps pesant

sur une ligne courbe, en

raison de la forme de cette ligne. Si le corps se meut sur la ligne ABC, fig. 124, et part du point A, il descendra en prenant une vitesse de plus en plus grande, jusqu'à ce qu'il arrive au point le plus bas B; en ce point, il aura la vitesse due à la hauteur de l'horizontale AC, au-dessus du point B. En vertu de sa



Fig. 124.

il remontera vers le point C ; mais, la pesanteur ment à ralentir son mouvement, sa vitesse diminuera que, quand il arrivera en un point E, il n'aura pas qu'il avait précédemment en passant au point D, veau. Tant qu'il ne sera pas arrivé en C, au niveau conservera encore une vitesse ascendante ; mais, dès ce point C, sa vitesse sera nulle, la pesanteur le jusqu'au point B, qu'il dépassera en vertu de sa il remontera vers le point A, puis redescendra de contraire, et ainsi de suite indéfiniment. Si le corps sur la ligne A B C D E, *fig. 125*, et qu'il partit du



Fig. 125.

drat jusqu'en B, remonterait en C, dépasserait ce endre en D, puis remonterait jusqu'au point E, si- point A. Sa vitesse étant devenue nulle en ce point ante de la pesanteur le ferait descendre en sens arcourrait ainsi le chemin E D C B A, pour s'arrêter , d'où il repartirait pour revenir en E, et ainsi de areil mouvement, la vitesse du corps ème, chaque fois qu'il se retrouvera len horizontal : ainsi les vitesses qu'il quatre points M N P Q seront égales

e.—Un corps pesant, de petites dimen- , telle qu'une balle de plomb, suspendu érieure d'un fil très-délié, dont l'ex- re B est fixe, constitue un *pendule*.

en équilibre lorsque le fil sera verti- rs son poids sera contrebalancé par , dans ce cas, ce ne sera autre chose b, dont on se sert pour reconnaître la verticalité une surface plane. Mais, si l'on dérange ce corps



Fig. 126.

A, et qu'on le place dans la position indiquée par la fig. 427, le libre sera rompu ; le poids du corps se décomposera en deux



Fig. 427.

dont l'une, dirigée suivant le longement du fil, sera dé tandis que l'autre, dirigée pe diculairement au fil, tendra mener le corps vers la p où il était en équilibre. Le A, ainsi mis en mouve restera nécessairement e cercle dont le centre est et dont le rayon est BA mouvra donc conformément que nous avons trouvé d § 96. Ce corps descendr le point B, avec une vite plus en plus grande ; ar

co point, il sera animé de la vitesse due à la hauteur verticale remontera, en vertu de sa vitesse acquise, jusqu'au point A au niveau du point A ; puis il redescendra pour revenir au et ainsi de suite. Le pendule fera ainsi une série d'oscillation les positions extrêmes BA et BA', et si aucune cause ext ne venait altérer ce mouvement, il s'entretenait indéfi Quand on fait l'expérience, ces oscillations successives se sent bien : mais on remarque bientôt que l'angle ABA' par les positions extrêmes du pendule, angle qu'on nomme l tude des oscillations, va en diminuant progressivement, t bout d'un certain temps cet angle devient nul ; en sorte que dule revient à l'état d'équilibre. Cette diminution progres l'amplitude des oscillations tient à la résistance que l'air op mouvement du pendule, et aussi aux résistances qui se pro toujours à son point de suspension, de quelque manière qu'on e cette suspension.

§ 98. Le temps que le pendule emploie à aller de la posit à la position opposée BA', est ce que l'on nomme la durée oscillation. Ce temps varie, lorsque l'amplitude change ; l'amplitude est petite, les changements qu'elle éprouve n'i pas d'une manière sensible sur la durée des oscillations. Dé par l'la longueur du pendule exprimée en mètres : par π le de la circonférence d'un cercle à son diamètre, rapport qui es près égal à 3 $\frac{1}{7}$, ou plus exactement $3\frac{1}{7}$; par g le nombre 9 comme précédemment, et par t la durée d'une petite os

les. La mécanique rationnelle apprend que cette oscillation est donnée par la formule

$$t = \pi \sqrt{\frac{l}{g}}.$$

Entre que, si la longueur du pendule varie, la durée varie comme la racine carrée de cette longueur; en avoir des pendules dont les durées d'oscillations comme les nombres 4, 2, 3, il faut leur donner des longueurs aux nombres 4, 4, 9. On peut vérifier aisément de la manière suivante. On prend deux pendules dont l'un est quatre fois plus long que l'autre, et on les fait osciller en deux points situés sur une même verticale. Si l'on écarte ces deux pendules de leur position d'équilibre d'une même quantité, comme le montre la fig. 129, puis qu'on les abandonne en même temps à eux-mêmes, ils occuperont successivement les positions relatives représentées par les fig. 130, 131. Après une oscillation entière du



Fig. 129. Fig. 130. Fig. 131.

pendule grand n'aura fait qu'une demi-oscillation, fig. 129; le petit aura achevé sa première oscillation, l'autre reviendra au point de départ, fig. 130. Lorsque le plus grand des deux aura fait une oscillation en sens contraire, le petit achèvera une oscillation, fig. 131; et enfin lorsque le grand pendule sera revenu à sa première position, le petit y sera également revenu, et ils retrouveront comme au commencement du mouvement. On voit par là que, pendant que le grand pendule fait une oscillation, le petit en fait deux. On en tire la loi qui donne la durée des petites oscillations d'un pendule simple, en mécanique rationnelle, en supposant que le fil est inextensible et que le corps suspendu à son extrémité se ré-

duit à un point matériel : ce pendule idéal est ce que l'on appelle un *pendule simple*. La lettre l , employée dans la formule, désigne la longueur du fil, comptée depuis son point d'attache jusqu'au point matériel qui le termine.

Lorsqu'un pendule est formé d'un fil matériel à l'extrémité duquel est attaché un corps pesant, quelque délié que soit le fil, quelque petit que soit le corps, ce n'est plus un pendule simple. Les pendules qui servent à régulariser le mouvement des horloges, et qui se composent d'une tige métallique terminée par un corps lenticulaire, sont encore plus loin du pendule idéal dont nous venons de parler. De pareils pendules sont désignés, par opposition, sous le nom de *pendules composées*.

Dans les oscillations d'un pendule composé, toutes les molécules dont il est formé oscillent de la même manière ; la durée de l'oscillation de chacune d'elles est la même que celle de toutes les autres. Cependant, si ces molécules étaient liées isolément au point de suspension par des fils flexibles non pesants, et que chacune pût osciller indépendamment des autres, elles formeraient autant de pendules simples de diverses longueurs, et leurs oscillations n'auraient pas la même durée : celles qui seraient plus rapprochées du point de suspension iraient plus vite, les autres iraient plus lentement. On voit donc que, lorsque toutes les molécules sont liées entre elles, et constituent ainsi le pendule composé, pour qu'elles oscillent toutes de même, il faut que le mouvement des unes soit ralenti, et celui des autres accéléré par leur dépendance mutuelle. Entre les premières et les dernières, il doit y avoir certaines molécules dont le mouvement n'est ni ralenti, ni accéléré, et qui oscillent de la même manière que si elles étaient seules. La distance d'une quelconque de ces molécules au point de suspension est ce que l'on nomme la *longueur du pendule* ; c'est la longueur du pendule simple équivalent au pendule composé, relativement à la durée des oscillations.

La mécanique rationnelle enseigne à trouver cette longueur, quelle que soit la figure du pendule composé, et de quelque matière que ses diverses parties soient formées. Dans le cas où le pendule est formé d'une balle de plomb suspendue à l'extrémité d'un fil délié, la longueur du pendule simple qui lui est équivalent ne diffère que d'une quantité insignifiante de la distance du point de suspension au centre de la balle ; c'est donc cette distance qu'on devra prendre pour la longueur du pendule, lorsqu'on voudra se servir de la formule qui donne la durée d'une petite oscillation.

§ 100. Si l'on cherche, par l'expérience, la durée d'une oscillation d'un pendule, en comptant, par exemple, le nombre d'oscillations

il effectue en une minute ou 60 secondes, et divisant 60 par ce nombre d'oscillations; et si, en outre, on détermine la longueur du pendule simple équivalent, on pourra, à l'aide de ces données, trouver très exactement la valeur du nombre que nous avons désigné par g . En effet, si l'on prend la formule écrite précédemment au § 88, qu'on élève au carré les deux membres de l'égalité, et qu'on résolve ensuite par rapport à g , on trouvera

$$g = \frac{\pi^2 l}{t^2}.$$

ce qui permettra de calculer la valeur de g , puisqu'on connaît les valeurs de π , de l et de t . C'est ainsi qu'on a trouvé que g est égal 9^m,8088, comme nous l'avons annoncé au § 88.

La même formule peut encore se mettre sous cette autre forme :

$$l = \frac{g t^2}{\pi^2}.$$

on pourra s'en servir pour trouver la longueur d'un pendule dont les oscillations aient une durée connue. Si l'on veut connaître, par exemple, la longueur du pendule à secondes, c'est-à-dire du pendule dont chaque oscillation a une durée d'une seconde, on remplacera t par 1, g par 9,8088, π par $\frac{355}{113}$, et on trouvera 0^m,994 pour cette longueur.

Cette longueur du pendule à secondes doit rester gravée dans la mémoire, afin qu'on puisse s'en servir au besoin. Il est, en effet, très facile de construire un pareil pendule, partout où l'on se trouve, en attachant une balle de plomb ou une bille à l'extrémité d'un fil délié, et suspendant ce fil de manière que la distance du point de suspension au centre de la balle ou de la bille soit de 0^m,994. À l'aide de ce pendule, qu'on fera osciller, on pourra mesurer très exactement la durée d'un phénomène, lorsque cette durée ne sera pas très longue. On pourra s'en servir, par exemple, pour compter le nombre de secondes qu'une pierre emploie à tomber de l'orifice d'un puits jusqu'à son fond, afin d'en déduire la profondeur du puits. Si on voulait un pendule qui fit chaque oscillation en une demi-seconde, il faudrait lui donner une longueur quatre fois plus petite, c'est-à-dire de 0^m,248.

§ 101. **Mouvement de l'escarpolette.** — L'escarpolette consiste en un siège suspendu à des cordes, sur lequel on se place pour se balancer dans l'air. Les cordes, au nombre de deux ou de quatre, sont attachées en deux points fixes, situés sur une même ligne horizontale. Quand l'escarpolette est mise en mouvement, elle tourne autour de cette ligne horizontale, comme autour d'un axe, et constitue ainsi un véritable pendule. Si l'on n'entretient pas le mouve-

120 PRODUCTION DU MOUVEMENT PAR LES FORCES.

ment, les oscillations successives ont des amplitudes de plus petites, et elles finissent, au bout de quelque temps, paraître tout à fait, ainsi que nous l'avons dit dans le § 9.

Il arrive cependant que, lorsqu'une personne, placée à l'escarpolette, imprime certains mouvements à son corps, l'amplitude des oscillations va en augmentant, et que, tout en très faible d'abord, cette amplitude peut devenir très grande. L'explication de ce fait que nous allons donner.

Imaginons qu'un pendule AB , *Fig. 132*, formé d'un p



Fig. 132.

A , et d'un fil très-délié, disposé de telle manière lorsqu'il descend vers le BC , il conserve toujours l'angle AB ; tandis que l'angle s'augmente, et qu'il sera de l'autre côté, se devienne brusquement p et se réduise à BD . une oscillation entière, décrira d'abord l'arc de p en descendant; arrivé p remontera brusquement p

enfin il achèvera l'oscillation en se mouvant sur l'arc de p

Il est facile de reconnaître que, dans ce cas, la demi-oscillation devra avoir une amplitude plus grande que l'oscillation descendante qui la précède. Le corps A , au moment qu'il arrive en C , est animé de la vitesse due à la hauteur CF , et est dirigée horizontalement; en se transportant brusquement en D , il conserve la même vitesse horizontale, et c'est avec cette vitesse qu'il monte le long du cercle DN ; il devra donc aller sur ce cercle jusqu'en un point H , dont la hauteur DK , du point D , soit égale à CF ; en sorte que, à la fin de la demi-oscillation ascendante, le pendule prendra la direction BH . Or, de voir que l'angle CBH est plus grand que l'angle ABC . Par exemple, si BD était la moitié de BC , il faudrait prendre la moitié de CF , pour que le point E , situé au niveau de D , déterminât un angle CBE , égal à ABC ; et puisque $DK < CF$, il s'ensuit que le point H est plus haut que le point E ; conséquence, que l'angle CBH est plus grand que l'angle ABC .

Admettons encore que le pendule, en partant de la direction BC , pour recommencer une autre oscillation, reprenne sa longueur primitive AB ; puis, qu'il se raccourcisse de nouveau, et

achève sa demi-oscillation descendante; la même raison fera l'amplitude de la demi-oscillation ascendante sera plus grande que l'angle CBH.

Le pendule se mouvant ainsi, en s'altérant lorsqu'il s'approche de la verticale, et se raccourcissant lorsqu'il s'éloigne, l'oscillation ira toujours en augmentant.

Environnant lesquel-venons de pouvoir un se réaliser peu près le mouvement

particulier de l'escarpolette dont nous voulons rendre compte comme qui se tient debout balancer, cherche à limiter l'amplitude des oscillations par les mouvements de son corps, se baisse et se relève alternativement. Il se tient ainsi la position indiquée dans la fig. 133, au commencement de chaque demi-oscillation descendante; se relève, au commencement de chaque demi-oscillation ascendante, et prend la position indiquée dans la fig. 134.

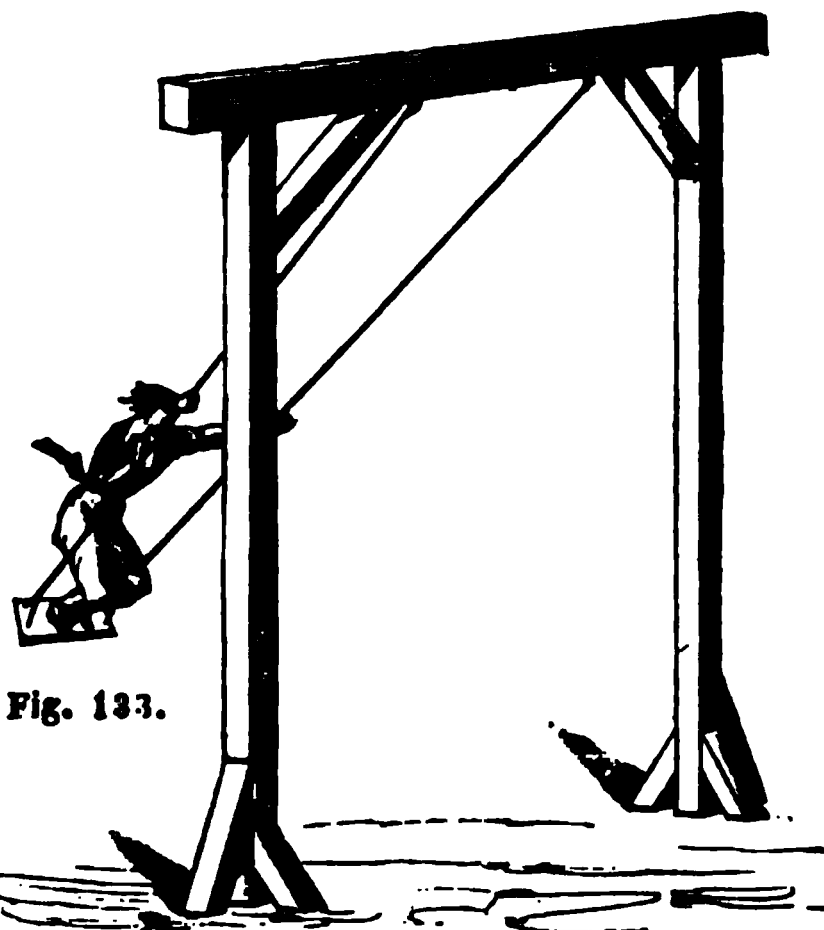


Fig. 133.

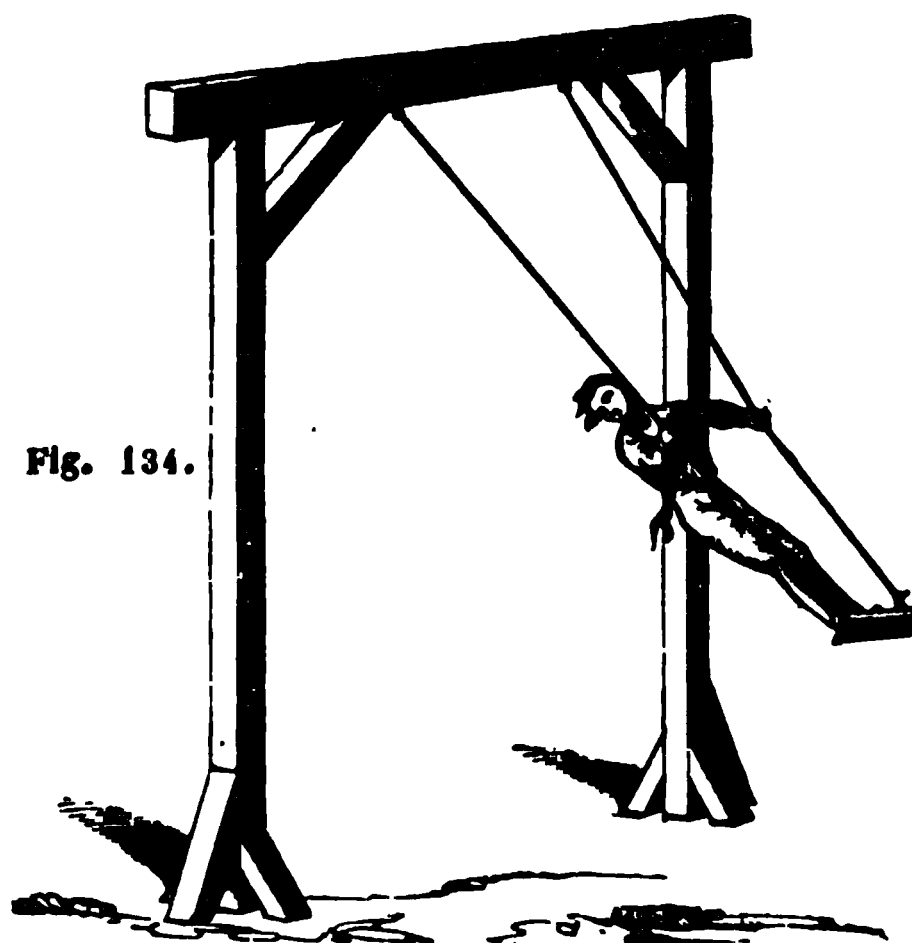


Fig. 134.

à chaque demi-oscillation ascendante, et prend la position indiquée dans la fig. 134.

sition représentée par la *fig. 134*. Dans le premier cas, une portion de son corps s'éloigne des points d'attache de l'escarpolette; dans le second cas, elle s'en rapproche. Il existe évidemment une grande analogie avec ce que nous avons supposé dans notre pendule, et le résultat doit être le même, c'est-à-dire que l'amplitude des oscillations doit aller constamment en augmentant.

§ 102. **Mouvement curviligne d'un corps entièrement libre.**—Lorsqu'un corps a été lancé dans l'espace avec une certaine vitesse, si aucune force ne venait agir sur lui pour modifier son mouvement, il se mouvrait uniformément et en ligne droite. Mais, dès le moment que ce corps sera soumis à l'action continue d'une force, son mouvement ne restera pas à la fois rectiligne et uniforme.

Si la force agit constamment suivant la direction du mouvement primitif du corps, elle ne changera pas la direction du mouvement, et ne fera que modifier la vitesse, en l'augmentant ou la diminuant, suivant qu'elle agira dans le sens du mouvement ou en sens contraire : le mouvement restera rectiligne, mais il ne sera plus uniforme. Ce cas se présente, par exemple, lorsqu'un corps pesant se meut suivant une ligne verticale, soit qu'on l'ait laissé tomber sans lui imprimer de vitesse, soit qu'on l'ait lancé de bas en haut.

Mais lorsque la force appliquée au corps n'agira pas suivant la direction de son mouvement, elle tendra à le détourner de sa route : elle l'en déviera en effet, à chaque instant, de plus en plus, et lui fera décrire une ligne courbe : le mouvement deviendra curviligne. On en a un exemple dans le mouvement d'un corps pesant lancé suivant une direction oblique : on voit ce corps monter, puis descendre, en décrivant une ligne courbe, parce que l'action de la pesanteur change à chaque instant la direction du mouvement que possède le corps. Nous reviendrons dans un instant sur cet exemple du mouvement curviligne.

Nous ne pourrions nous rendre complètement compte de la manière dont le mouvement d'un corps est rendu curviligne, par l'action incessante d'une force non dirigée suivant le mouvement, que lorsque nous saurons composer entre elles deux vitesses dont un corps se trouve animé simultanément. C'est ce dont nous allons nous occuper d'abord.

§ 103. **Composition des vitesses.** — Il peut paraître difficile, au premier abord, de concevoir qu'un corps soit animé, à la fois, de deux vitesses : l'exemple suivant lèvera toute incertitude à cet égard. Imaginons qu'un bateau se meuve uniformément, et en ligne droite, le long d'une rivière : une bille posée sur le pont, en un point A. *fig. 135*, participe au mouvement du bateau, et sans se déplacer

sur le pont, elle se meut uniformément suivant la ligne droite A B. Si l'on vient à lancer cette bille de manière à la faire rouler unifor-

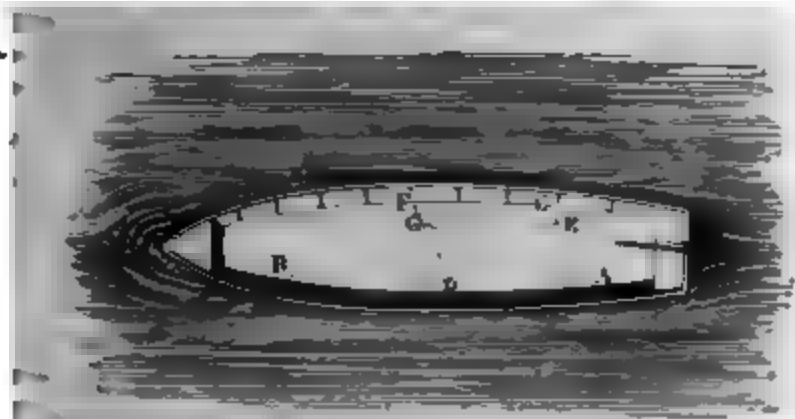


Fig. 136.

mément sur le pont, suivant la ligne AC, elle se trouvera animée de deux mouvements à la fois : 1° du mouvement du bateau ; 2° de son mouvement par rapport au bateau.

Soit AD le chemin que la bille parcourrait en une seconde, en vertu du premier mouvement seul, c'est-à-dire la vitesse de ce premier mouvement, vitesse qui est la même que celle du bateau ; soit de plus AE la vitesse de la bille, dans son mouvement de roulement sur le pont. Au bout d'une seconde, le bateau se sera avancé d'une quantité égale à AD ; la ligne AC, sur laquelle la bille roule, et qu'on peut supposer tracée sur le pont, se sera transportée parallèlement à elle-même dans la position DF. Mais, en même temps, la bille aura marché sur cette ligne d'une quantité égale à AE, et, comme le point K se sera transporté en G, en décrivant EG parallèle à AD, la bille se trouvera en G, à la fin de la seconde que nous considérons.

La bille était au point A au commencement de cette seconde, et elle est au point G à la fin : or, il est aisé de voir que, pendant toute la durée de cette seconde, elle n'a pas cessé de se trouver sur la ligne AG, et qu'elle l'a parcourue d'un mouvement uniforme. Si l'on cherchait, en effet, par le raisonnement qu'on vient de faire, où était la bille après une demi-seconde, un quart de seconde, on trouverait qu'elle était située sur la ligne AG, à la moitié, au quart de cette ligne, à partir du point A. Donc, en définitive, la bille, animée simultanément d'une vitesse AD, et d'une autre vitesse AE, dont les directions sont différentes, se trouve avoir une vitesse unique, représentée en grandeur et en direction par la diagonale du parallélogramme construit sur les vitesses AD et AE.

124 PRODUCTION DU MOUVEMENT PAR LES FORCES.

On remarquera l'analogie qui existe entre la composition des vitesses dont un même corps est animé, et la composition des forces appliquées à un même point suivant des directions différentes. En raison de cette analogie, on emploie les expressions de composantes et de résultante pour les vitesses, aussi bien que pour les forces : AD et AE sont les vitesses composantes ; AG est la vitesse résultante.

§ 104. *Mouvement parabolique d'un corps pesant.* — Lorsqu'un corps pesant est lancé horizontalement, quelque grande que soit sa vitesse, il ne continue pas à se mouvoir suivant une ligne horizontale : la pesanteur l'abaisse de plus en plus au-dessous de cette ligne, et lui donne ainsi un mouvement curviligne. Pour étudier plus facilement la manière dont se produit le changement continu de direction du mouvement, nous imaginerons que la pesanteur, au lieu d'agir sans interruption, n'exerce son action sur le corps que d'une manière intermittente : nous supposerons, par exemple, que la durée totale du mouvement étant divisée en quarts de seconde, la pesanteur agisse brusquement au commencement de chacun de ces petits intervalles de temps, puis qu'elle cesse d'agir, pour recommencer au commencement de l'intervalle de temps suivant.

Dans cette hypothèse, le corps lancé horizontalement suivant la ligne AM, fig. 136, ne reste sur cette ligne que pendant un quart



Fig. 136.

de seconde. Au bout de ce temps, arrivé en B, il reçoit une impulsion de la pesanteur, qui lui imprime une vitesse verticale BB' ; cette vitesse se compose avec la vitesse BB'' qu'il possédait, et il en résulte une vitesse BB''' . Le corps se meut pendant un quart de seconde suivant la ligne BB''' , et arrivé en C, au quart de cette ligne, il reçoit une nouvelle impulsion de la pesanteur. Si l'on imagine que la vitesse qu'il possédait, en arrivant en ce point, soit décomposée en deux composantes Cc et CC'' , égales et parallèles aux composantes BB' , BB'' , la vitesse que lui communiquera la pesanteur, par son action instantanée au point C, s'ajoutera à la composante Cc, pour former une vitesse verticale double CC' ; et, après cette seconde action de la pesanteur, le corps sera animé

tesse CC'' , résultante des vitesses CC' et CC'' . De même, à nouveau quart de seconde, le corps ayant parcouru le $e CC''$, et étant arrivé en D, pourra être regardé comme le deux vitesses Dd , DD'' , égales et parallèles aux com-
 a CC' , CC'' : la pesanteur agissant de nouveau, lui don-
 core, dans le sens vertical, le même accroissement de
 en sorte que la composante Dd , double de BB' , sera rem-
 par la vitesse DD' , triple de BB' , et le corps se trouvera
 le la vitesse DD'' , résultante des composantes DD' , DD'' .
 ouvra pendant un quart de seconde suivant cette ligne, de
 , puis la pesanteur changera encore la grandeur et la direc-
 sa vitesse, et ainsi de suite indéfiniment. On voit donc que,
 ypothèse où nous nous sommes placés, le corps décrira le
 e ABCDE.

en de supposer que la pesanteur agit à des intervalles d'un
 le seconde, on pourrait admettre que c'est après chaque
 de seconde qu'elle donne une nouvelle impulsion au corps,
 riverait à un résultat analogue, si ce n'est que les côtés du
 e décrit par le corps seraient plus petits et plus nombreux,
 e même durée totale de mouvement. Enfin, si l'on revient à
 é, on verra que la pesanteur, agissant sans cesse, fera dé-
 corps, non plus un polygone, mais une ligne courbe. De
 l'on décompose à chaque instant la vitesse du corps en une
 ente horizontale et une composante verticale, on trouvera que
 ente horizontale est toujours égale à la vitesse qu'on avait
 le au corps en le lançant; tandis que la composante verti-
 et autre chose que la vitesse qui lui aurait été communiquée
 esanteur, s'il était tombé depuis le commencement du mou-
 sous la seule action de cette force, et sans qu'on l'ait lancé.

suite de là que, pour
 résumer le mouve-
 un corps qui a été
 rizontalement à par-
 point A, fig. 137,
 ie certaine vitesse,
 suivant AM, on
 concevoir que ce
 tombe verticalement
 de la ligne AN,
 tesse initiale, et que



Fig. 137.

ne soit transportée parallèlement à elle-même, ainsi que
 j'ai la décrit, avec une vitesse horizontale dirigée sui-

126 PRODUCTION DU MOUVEMENT PAR LES FORCES.

vant AM, et égale à la vitesse de projection dont on vient de parler. Au bout d'une seconde, la ligne AN vient prendre la position BP; mais en même temps le corps est tombé sur cette ligne d'une quantité BG: il se trouve donc alors au point G. Au bout de deux secondes, la ligne AN se place en CQ; mais le corps a parcouru sur cette ligne une distance CH, quatre fois plus grande que BG: il est donc en H, à la fin de la deuxième seconde. On verra de même que si, sur la position DR, que prend la ligne AN après trois secondes, on porte une longueur DI égale à neuf fois BG, on aura en I la position qu'occupera le corps à cet instant; et en continuant ainsi on trouvera les positions du corps après 4, 5, 6..., secondes. On pourra d'ailleurs trouver, tout aussi facilement, des positions intermédiaires de ce corps, telles que celles qu'il prendra, par exemple, après $\frac{1}{2}$ seconde, 1 seconde et demie, 2 secondes et demie, ..., de mouvement, en sorte qu'on sera en mesure de tracer la ligne courbe qu'il décrit. Cette ligne courbe se nomme, en géométrie, une *parabole*: sa forme dépendra de la grandeur de la vitesse avec laquelle le corps aura été lancé horizontalement. Les fig. 138, 139, 140 représentent les paraboles décrites par des corps lancés avec des vitesses horizontales, qui sont



Fig. 138.

Fig. 139.

Fig. 140.

entre elles comme les nombres 1, 2 et 3.

On peut vérifier par l'expérience qu'un corps, lancé horizontalement, et soumis ensuite à la seule action de la pesanteur, décrit bien une parabole, conformément à ce que nous venons de voir. À cet effet, on se sert de l'appareil représenté par la fig. 141. Cet appareil consiste en un tableau de bois, sur lequel on a tracé plusieurs paraboles, partant d'un même point A, et représentant les chemins que doit parcourir un corps lancé horizontalement de ce point, avec des vitesses différentes; à côté du point A se trouve un morceau de bois B, qui fait saillie sur le tableau, et dont la face courbe présente une rainure longitudinale: cette rainure est disposée de telle manière qu'une bille qui la suit, en roulant sous l'action de la pesanteur, arrive au bas avec une vitesse horizontale, et que le centre de cette bille est au niveau du point A, au moment où elle

En laissant rouler la bille successivement à partir de cette rainure, elle acquerra, en arrivant au bas des hauteurs ; et,

tâtonnera à la vitesse pour une accélération sur la surface plus connue ; suit bien la parabole en plus la courbe, vis dans peut passer, en

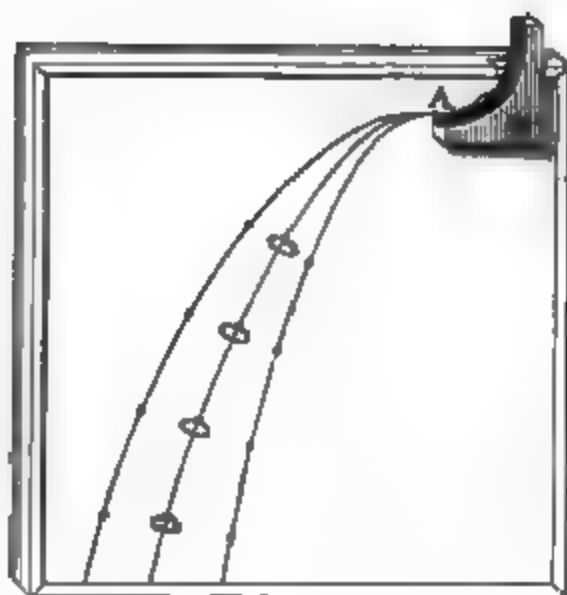


Fig. 141.

Si, sur la rainure, on la verra traverser tous ces

Fig. 141 montre les anneaux disposés le long d'une courbe qui y sont tracées ; on aperçoit le long des deux courbes dans lesquelles on les fixera, pour faire l'expérience de la bille des vitesses initiales différentes.

Fig. 142, la parabole que décrit un corps pesant lancé horizontalement au point A, dans

une direction f . Si, à chaque instant de son mouvement, on décompose sa vitesse en deux, l'une horizontale et l'autre verticale, on verra, ainsi que nous l'avons vu, que la composante horizontale reste toujours la même et que la composante verticale est proportionnelle au temps : lorsqu'il sera arrivé en B, il aura acquis la vitesse résultant de la composante horizontale qui lui a été imprimée au point A, et de la composante verticale que la pesanteur lui a donnée pendant son mouvement.

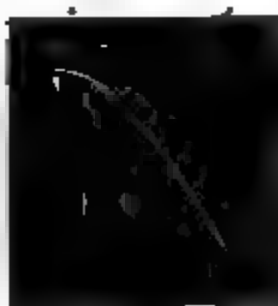


Fig. 142.

La composante horizontale qui lui a été imprimée au point A, et la composante verticale que la pesanteur lui a donnée pendant son mouvement.

Ensuite le corps soit lancé, à partir du point B, avec la même vitesse qu'il avait acquise en arrivant à ce point, mais en une direction différente, comme l'indique la fleche f' . La pesanteur diminuera la composante verticale de cette vitesse d'impul-

sion, de la même manière qu'elle avait augmenté la vitesse verticale du corps, lorsqu'il avait été lancé dans le sens de la flèche f ; d'ailleurs la composante horizontale ne sera pas modifiée: en sorte que le corps reprendra successivement, mais dans un ordre inverse, des vitesses égales et contraires à celles qu'il avait eues précédemment. Il en résulte nécessairement que le corps reposera, en montant, par le chemin qu'il avait parcouru en descendant, c'est-à-dire qu'il décrira la même parabole AB , en allant de B vers A . Arrivé au point A , il sera animé précisément de la vitesse horizontale, avec laquelle on l'avait d'abord lancé de ce point.

Nous sommes maintenant en mesure de voir quel mouvement prendra un corps pesant, lancé obliquement suivant une direction telle que AB , fig. 143. Ce corps décrira d'abord, en montant, un arc



Fig. 143.

AC de parabole; puis, arrivé au point C , où son mouvement sera dirigé horizontalement, il se trouvera dans les mêmes conditions que s'il était lancé de ce point, dans la direction CD , c'est-à-dire qu'il parcourra un nouvel arc CF de parabole. Les deux arcs AC et CF présentent une symétrie complète par rapport à la verticale qui passe par le point le plus haut C ; le chemin ACF parcouru par le corps n'est

qu'une portion de la parabole complète et indéfinie MCN .

§ 406. La figure de la parabole, que décrit un corps pesant lancé obliquement, dépend à la fois de la grandeur et de la direction de la vitesse qui lui a été imprimée. Si l'on fait varier seulement la direction de cette vitesse, sans changer sa grandeur, qu'on suppose par exemple que le corps soit lancé toujours de la même manière, et successivement, suivant les directions AB , AC , AD , AE , fig. 144, on lui verra décrire les différentes paraboles AB' , AC' , AD' , AE' . La première de ces paraboles s'abaisse immédiatement au-dessous de la ligne horizontale AB ; tandis que les autres, après s'être élevées au-dessus de cette ligne, viennent la rencontrer en des points G , H , K , inégalement éloignés du point A .

Chacune des distances AG , AH , AK se nomme l'amplitude de jet correspondant. L'amplitude du jet varie donc avec la direction de la vitesse initiale qui a été imprimée au mobile. L'étude complète

Il montre que, si la direction de la vitesse initiale fait un angle CAB , fig. 144, avec la ligne horizontale,



Fig. 144.

le jet sera petite; que, si cette direction se relève de plus en plus au-dessus de l'horizon, l'amplitude du jet augmentera jusqu'à ce que la vitesse initiale fasse avec l'horizon un angle de 45° : que, si la direction de la vitesse initiale se rapproche davantage de la verticale AF , l'amplitude du jet diminuera jusqu'à ce qu'elle devienne tout à fait nulle, lorsque la vitesse initiale est dirigée suivant AF . C'est donc sous un angle de 45° avec l'horizon, que le corps devra être lancé, pour que, à égalité de vitesse initiale, l'amplitude du jet atteigne sa plus grande valeur. On voit, en outre, que cette plus grande valeur AH est le double de la hauteur AF , à laquelle le corps se serait élevé, s'il avait été lancé verticalement, et de bas en haut, avec la même vitesse.

On voit, par le tir des projectiles, lorsqu'on veut atteindre un but, que l'on ne doit pas lancer le mobile suivant la ligne droite qui le dirige vers le but. On voit, d'après ce qui précède, qu'on doit toujours diriger le mouvement initial au-dessus de cette ligne droite, de sorte que le mobile atteigne le but, en décrivant la parabole que la pesanteur lui fait nécessairement décrire. C'est ce qu'on a toujours observé dans le tir du canon, et l'adresse de l'artilleur consiste à donner au canon une inclinaison convenable, en tenant compte de la déviation que le mouvement du boulet éprouve par suite de l'action de la pesanteur.

Dans le tir du fusil, on dirige le canon au moyen de deux points

130 PRODUCTION DU MOUVEMENT PAR LES FORCES.

de repère placés vers ses deux extrémités. On juge qu'il a bien la direction convenable, lorsque le rayon visuel qui passe par ces deux points A, B, *fig. 145*, va aboutir au but qu'on veut atteindre. Cette

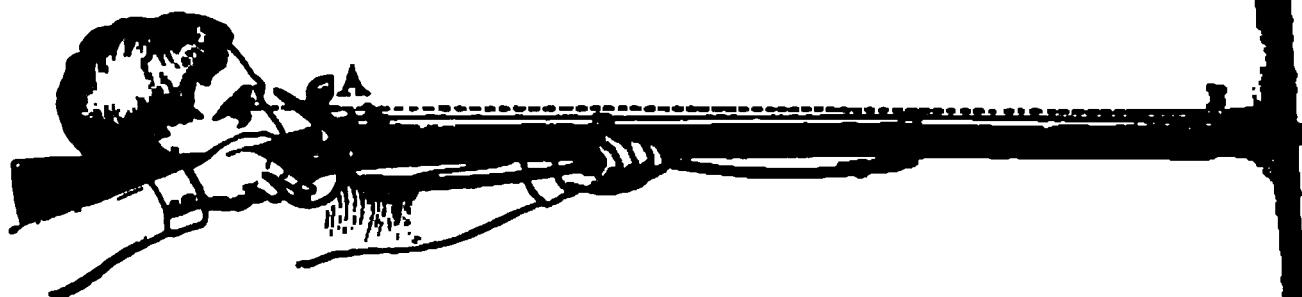


Fig. 145.

ligne de visée se trouvant parallèle à l'axe du canon, si le projectile part exactement suivant cet axe, il devra nécessairement arriver un peu au-dessous du but ; mais la déviation que la pesanteur lui fait ainsi éprouver est très peu de chose, en raison de la grandeur de sa vitesse relativement à la distance qu'il a ordinairement à parcourir.

Cependant, dans les fusils perfectionnés, tels que ceux dont sont armés les chasseurs de Vincennes, et à l'aide desquels on peut atteindre à une distance très grande, on a rendu mobile le point de repère qui est le plus rapproché de l'œil ; on peut élever ou abaisser à volonté ce point de repère, suivant que le but à atteindre est plus ou moins éloigné. De cette manière, en visant le but à l'aide du repère fixe B, *fig. 146*, et du repère mobile A, qu'on a suffisamment

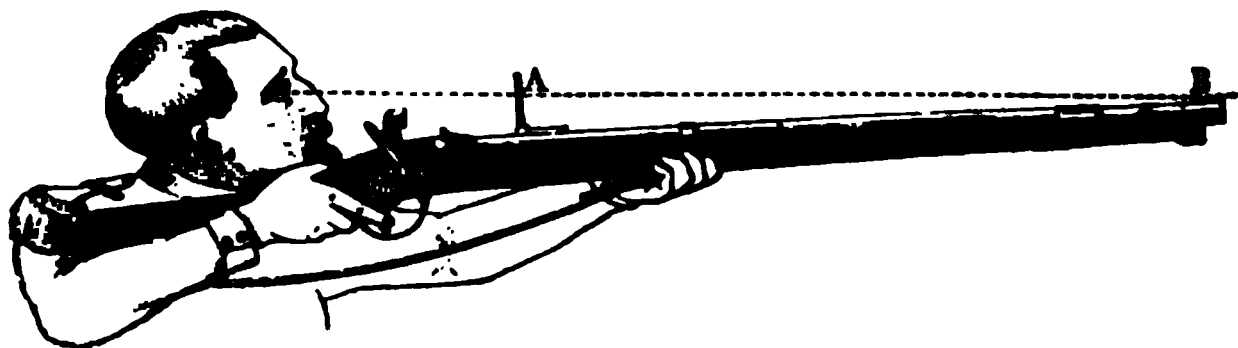


Fig. 146.

éloigné du canon, la balle part suivant une direction oblique par rapport à la ligne AB, elle décrit sa parabole, et peut ainsi arriver au point qu'on veut atteindre.

§ 108. **Mouvement des corps célestes.** — L'astronomie nous enseigne que la terre et les autres planètes sont des corps isolés, libres, qui circulent autour du soleil, en décrivant des courbes fermées qui approchent beaucoup d'être des cercles : de même, la lune décrit à peu près un cercle autour de la terre. Il va nous être facile de nous rendre compte de la manière dont se produisent ces mouvements curvilignes.

Si la terre, à un moment donné, était soustraite à l'action de toute force extérieure, elle se mouvrait uniformément et en ligne droite, en raison de la vitesse qu'elle posséderait dans ce moment. Puisqu'elle se meut en ligne courbe, il faut qu'elle soit soumise à l'action d'une force qui la dérange, à chaque instant, du mouvement rectiligne qu'elle tend à prendre en vertu de son inertie. Newton a démontré que cette force est dirigée vers le centre du soleil, comme l'indique la flèche tracée sur la fig. 147, où S est le soleil et T la Terre; en sorte que les choses se passent comme si le soleil attirait la terre. Il a démontré de plus que la grandeur de cette force de gravitation varie en raison inverse du carré de la distance de la terre au soleil. Sous l'action d'une pareille force, la terre tend à tomber vers le soleil, de même qu'une pierre, soumise à la pesanteur, tombe sur le sol : la terre tomberait en effet sur le soleil, si elle n'avait pas de



Fig. 147.

vitesse initiale, ou bien si sa vitesse était dirigée suivant la ligne TS. Mais la vitesse qu'elle possède, suivant la tangente TA à la ligne courbe qu'elle vient de décrire, l'empêche de tomber ainsi : elle se trouve dans les mêmes conditions qu'un corps pesant qu'on lance suivant une direction horizontale, ou presque horizontale. Si elle ne décrit pas comme lui une parabole, cela tient à ce que, à mesure qu'elle se déplace, la force qui agit sur elle, passant toujours par le centre du soleil, change constamment de direction. tandis que, dans le cas d'un corps pesant qu'on lance à la surface de la terre, on regarde la pesanteur comme agissant sur lui toujours dans la même direction, à cause de la petitesse du chemin que parcourt ce corps relativement aux dimensions de la terre. Il est vrai que, quelle que soit la vitesse avec laquelle on lance un corps pesant, on le voit toujours tomber sur la terre au bout de quelque temps; et, en raison de l'analogie que nous établissons entre le mouvement de ce corps et le mouvement de la terre autour du soleil, il semble que nous soyons conduits à en conclure, contrairement à ce que l'on observe, que la terre doit finir par tomber sur le soleil : mais on va voir qu'il n'en est pas ainsi.

Si un boulet de canon est lancé horizontalement avec des vitesses de plus en plus grandes, il va tomber sur la terre, en des points de plus en plus éloignés, et la parabole qu'il décrit a une courbure de moins en moins prononcée. Ce boulet rencontrerait toujours la surface de la terre, quelque grande que soit sa vitesse de projection,

132 PRODUCTION DU MOUVEMENT PAR LES FOR

si cette surface était un plan, comme le montre la fig.



Fig. 148.

décrire, sera plus courbée que la surface de la terre, ment que sa vitesse de projection sera assez grande,



Fig. 149.

surface de
courbe, puis
peu près la
sphère : le b
bera donc st
tant que la
ou AC, ou
que la pesa

rabole AE qu'il
pas plus courbée
de la terre, il ne to
cette surface. Dan
le boulet se transp
de son point de d
plus permis de st
pesanteur agit su
directions parallè

séquence il ne décrira plus une parabole. Il doi
comme étant soumis à l'action d'une force dont la
toujours par le centre de la terre ; lorsqu'il aura déci
sans se rapprocher de la terre, il se trouvera donc ex
les mêmes conditions qu'au commencement de son
il continuera à se mouvoir de la même manière, et
indéfiniment autour de la surface de la terre, sans
contrer, à moins qu'une cause extérieure, telle qu
de l'air, ne vienne diminuer sa vitesse. Pour qu'u
horizontalement se meuve, comme nous venons de
tomber sur le sol, et constitue ainsi une espèce de
terre, comme la lune, il faudrait lui imprimer une v
moins de 8000 mètres par seconde.

La terre, dans son mouvement autour du soleil,
ciément dans le cas du boulet dont nous venons
vitesse qu'elle possède, à un moment quelconque, es
pour lui faire décrire à peu près un cercle autour d
est de même des autres planètes, dans leur mouve
soleil, et de la lune dans son mouvement autour de

§ 109. **Mouvement circulaire, force centril**
qu'on fait tourner rapidement un corps A, fig. 150, at
extrémités d'une corde AB, dont l'autre extrémité

se tend, et elle pourrait même se rompre, si le mouvement de rotation était assez rapide. Cela provient de ce que le corps tend, à ce moment, à se mouvoir en ligne droite, suivant la direction du mouvement qu'il avait dans l'instant précédent : la corde ne peut l'obliger à se mouvoir suivant une

circumférence de cercle, qu'en exerçant sur lui une force de traction dirigée vers le centre; le corps réagit, et c'est cette réaction qui détermine la tension de la corde. Pendant que le corps tourne, il agit sur la corde de la même manière que s'il était soumis à l'action d'une force qui tendrait à l'éloigner du centre de son mouvement : cette force se nomme la *force centrifuge*.



Fig. 150.

La force centrifuge est développée par l'obligation dans laquelle se trouve le corps de décrire une circonférence de cercle : aussitôt que cette obligation cesse, la force centrifuge est anéantie. Si, par exemple, pendant le mouvement de rotation, on vient à couper la corde, le corps se mouvra suivant la tangente AC , menée par le point du cercle où il était lorsqu'on l'a rendu libre; son mouvement ne sera que la continuation de celui qu'il avait au moment où l'on a coupé la corde, et ne sera modifié en aucune manière par la force centrifuge qui a cessé d'exister à ce moment même. La force centrifuge détermine donc la tension de la corde, elle peut même occasionner sa rupture : mais elle n'agit plus dès que le corps a cessé d'être obligé de décrire le cercle.

La fronde, qui sert à lancer des pierres, consiste, comme on sait, en un morceau de toile ou de peau, auquel sont attachées deux petites cordes, fig. 151. On place une pierre, comme la figure l'indique, on saisit les extrémités des deux cordes, et l'on imprime à la

151. fronde un mouvement rapide de rotation autour de la main. Pendant ce mouvement, les cordons sont tendus par la *force centrifuge*; et si, à un moment donné, on abandonne ces deux cordons, la pierre, rendue libre, ne décrit plus

la circonférence qu'elle décrivait précédemment : elle part suivant la tangente à cette circonférence, menée par le point où elle se trouvait lorsqu'elle a cessé d'être retenue par la fronde. Le dresse de celui qui se sert de cet instrument consiste à abandonner la pierre en un point convenable A, *fig. 142*, pour que, partant de ce point suivant la tangente au cercle,



Fig. 142.

puis décrivant une parabole sous l'action de la pesanteur, elle peut arriver au point B que l'on veut atteindre.

§ 440. La force centrifuge qui se développe dans un mouvement de rotation peut être rendue sensible à l'aide des expériences suivantes.

La *fig. 453* représente un appareil ABC, supporté par un pied



Fig. 143.

solide en bois, et qui peut tourner horizontalement sur ce pied : en tirant une corde qui fait plusieurs tours sur la partie cylindrique A, on peut donner à l'appareil un mouvement rapide de rotation. Entre les deux points B et C se trouve un fil métallique bien tendu, le long duquel peuvent se mouvoir deux billes d'ivoire D, E, traversées par ce fil. La bille D étant placée comme l'indique la figure, si l'on veut à faire tourner rapidement l'appareil, on la voit s'éloigner du centre du mouvement, et se transporter à l'extrémité B du fil métallique. La bille E, se trouvant dans des conditions semblables, tend aussi à se transporter en C; mais elle en est empêchée par un ressort en hélice, qui a été disposé tout autour du fil. La bille E

loigne cependant du centre de son mouvement; elle comprime le ressort, et la tension qu'elle lui communique ainsi peut servir à mesure à la force centrifuge développée par le mouvement de rotation.

La fig. 154 représente un autre appareil qui se monte sur le même

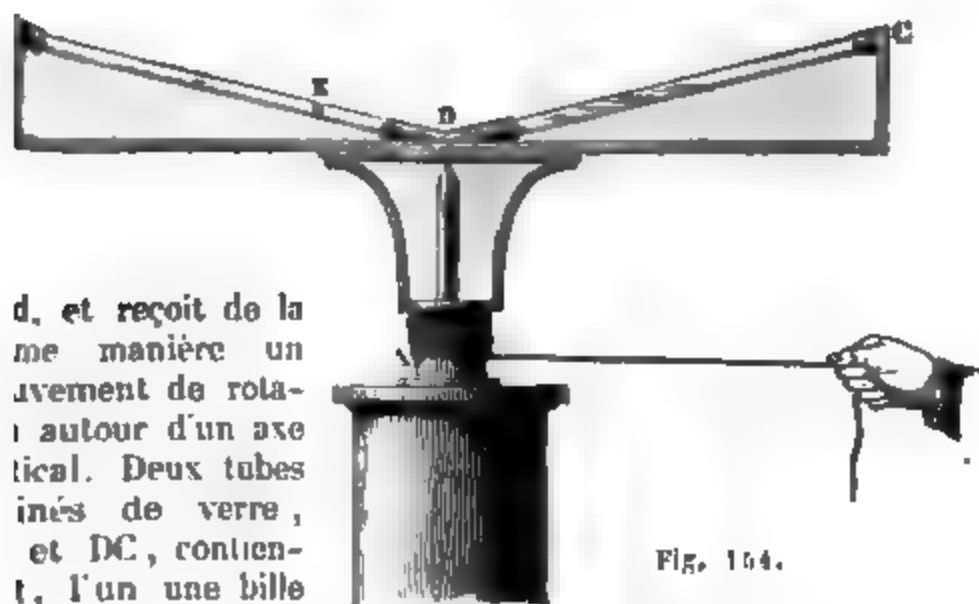


Fig. 154.

d, et reçoit de la même manière un mouvement de rotation autour d'un axe vertical. Deux tubes inclinés de verre, l'un AB, et DC, contiennent, l'un une bille et l'autre une cer-

cette quantité d'eau. Lorsqu'on fait tourner rapidement ces deux tubes, on voit la bille et l'eau monter vers leurs extrémités supérieures B, C. Pour nous rendre compte de la manière dont se produit ce mouvement ascendant, examinons ce qui arriverait si, pendant la rotation de l'appareil, la bille se trouvait en un point quelconque du tube qui la contient. Cette bille est soumise à l'action de son poids, qui est la force verticale EF, fig. 155, et, en outre, à l'action de la force centrifuge EG, qui est dirigée de manière à toujours signer de l'axe de rotation; elle est donc dans les mêmes conditions que si elle était soumise à l'action de la force unique EH, résultante des deux forces précédentes. Si cette force EH

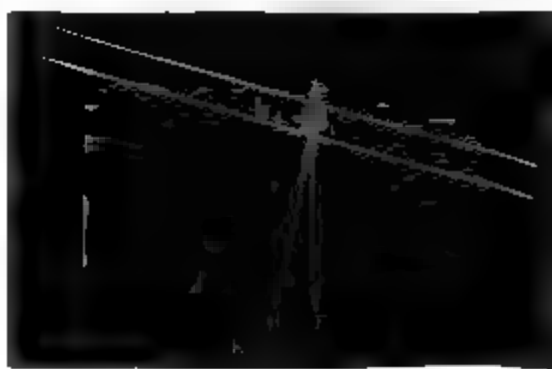


Fig. 155.

dirigée au-dessous de la perpendiculaire EK à la direction du tube, fig. 155, la bille descendra vers la partie inférieure du

136 PRODUCTION DU MOUVEMENT PAR LES FORCES.

tube; mais si, la force centrifuge étant plus grande, la tige EH est dirigée au-dessus de la perpendiculaire

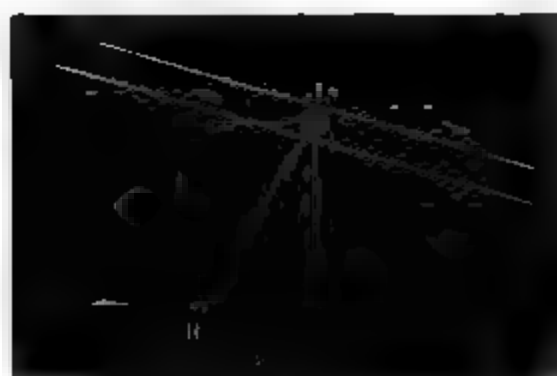


Fig. 136.

436, la bille monte du tube. On voit donc développant une force centrifuge assez grande à-dire en produisant un mouvement de rotation très rapidement, devra s'élever jusqu'à l'extrémité B. On voit par là comment l'extrémité supérieure du tube.

La Fig. 437 montre la disposition d'un troisième appareil duquel on peut encore mettre en évidence la force centrifuge

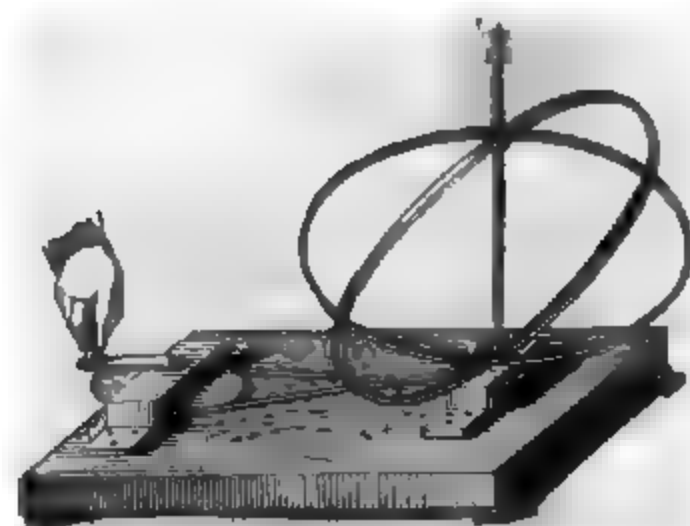


Fig. 137.

développée par le mouvement de rotation. Deux lames de métal sont courbées en cercles, et les extrémités de l'une à l'autre sont fixées à la partie inférieure des ressorts. Les ressorts sont disposés dans des plans verticaux perpendiculaires

l'un à l'autre. Une tige de fer, dirigée suivant le diamètre vertical commun aux deux cercles, est fixée à chacun d'eux à sa partie inférieure; tandis qu'à la partie supérieure, elle les traverse librement passant dans des trous qui ont été pratiqués dans les lames. Cette disposition permet de déformer les cercles en abaissant ou en élevant leur partie supérieure avec la main. La tige peut recevoir un mouvement rapide de rotation sur elle-même par l'intermédiaire d'une manivelle et d'une corde sans fin; et comme elle est la partie inférieure des ressorts, elle leur communique

vement. Aussitôt que les ressorts tournent, on les voit se déformer; le diamètre vertical se raccourcit, le diamètre horizontal s'allonge, comme le montre la *fig. 157*: et cette déformation est d'autant plus marquée que le mouvement de rotation est plus rapide. On voit encore ici un effet de la force centrifuge : pendant que les ressorts tournent, toutes leurs molécules sont dans les mêmes conditions que si elles étaient tirées par des forces qui tendraient à les éloigner de l'axe de rotation; et il est clair que, sous l'action de pareilles forces, les ressorts doivent s'allonger dans le sens horizontal.

Si l'on suspend un vase plein d'eau à l'extrémité d'une corde dont on tient l'autre extrémité dans la main, et qu'on fasse tourner le tout comme une fronde, le vase restera plein, quoique, lorsqu'il est au haut du cercle qu'on lui fait décrire, il soit complètement renversé, *fig. 158*. Cela vient de ce que, pendant tout le mouvement, l'eau contenue dans le vase n'est pas soumise à la seule action de son poids : la force centrifuge qui se développe modifie l'effet qui serait produit, si la première force agissait seule. Lorsque le vase est au haut du cercle qu'il décrit, l'eau tend à tomber en vertu de son poids; mais la force centrifuge, qui est dirigée de bas en haut, tend au contraire à la faire monter : il suffit donc que cette dernière force soit plus grande que la première, pour que l'eau se maintienne dans le vase sans tomber.

§ 114. La force centrifuge va nous donner l'explication de certains faits qu'on observe quelquefois.

Lorsqu'un écuyer se tient debout sur un cheval qui parcourt rapidement le contour d'un cirque, il ne se place pas verticalement sur le cheval : son corps est penché vers le centre du cirque, et il l'est d'autant plus que le cheval va plus vite. *fig. 159*. C'est la force centrifuge qui l'oblige à prendre cette position ; il tomberait nécessairement, s'il se plaçait sur le cheval de la même manière que lorsque celui-ci ne marche pas. Les forces centrifuges, qui se déve-

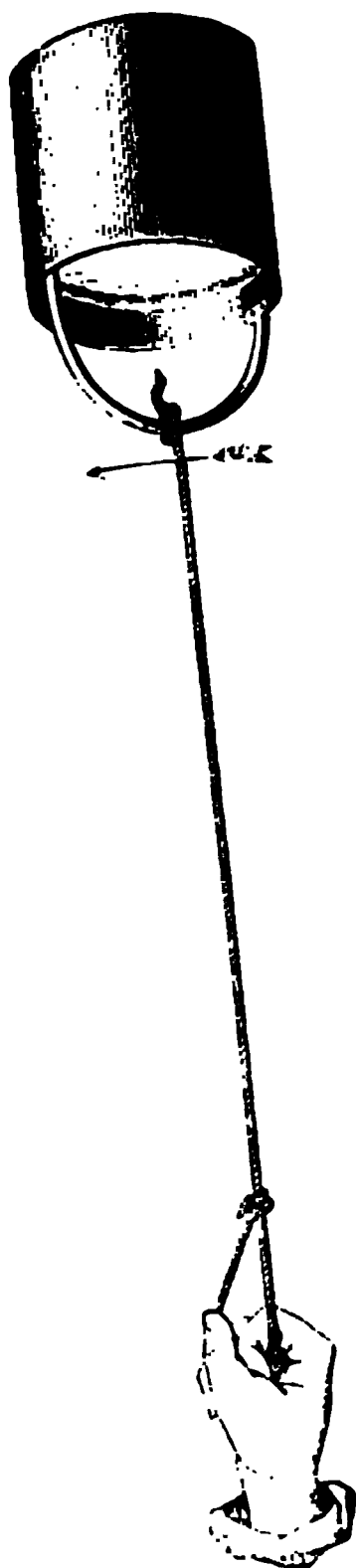


Fig. 158.

loppent dans les diverses parties du corps de l'écuyer, se composent en une force unique, qui est dirigée horizontalement, et qui tend à l'éloigner du centre du cirque; cette force se compose, à son



Fig. 168.

tour, avec le poids de son corps, et, pour qu'il ne tombe pas, sous l'action de la résultante qui est oblique, il faut qu'il s'incline comme elle, afin qu'elle passe à l'intérieur de son polygone d'appui sur le cheval (§ 42).

Lorsque, dans les mêmes circonstances, un cheval tourne dans le cirque avec une grande vitesse, on voit quelquefois un écuyer, assis de côté, ne poser que sur le flanc du cheval. Il tomberait infailliblement s'il n'était soumis qu'à l'action de la pesanteur : mais la force centrifuge le maintient en équilibre, comme dans le cas précédent.

Dans les ateliers où des meules de grès sont animées de mouvements rapides de rotation, il arrive quelquefois qu'une meule se brise en éclats, et que les morceaux en sont lancés de tous côtés avec une grande vitesse, ce qui peut donner lieu à des accidents très graves. Pour se rendre compte de cet effet, on observera que, pendant le mouvement d'une meule, chaque molécule est soumise à une force centrifuge qui tend à l'éloigner de l'axe de rotation; mais les forces moléculaires, qui se développent aussitôt que les molécules tendent à se déplacer les unes par rapport aux autres, s'opposent à l'action des forces centrifuges. Habituellement les forces molé-

Elles sont assez puissantes pour vaincre les forces centrifuges : mais si une meule est en mauvais état, et que son mouvement s'accélère trop, les dernières forces finissent par l'emporter, et la meule vole en éclats. Il ne faut pas croire cependant que ce soit la force centrifuge qui lance les morceaux de la meule de tous côtés. La force centrifuge existe tant que la meule est entière ; c'est elle qui détermine sa rupture ; mais dès le moment qu'un morceau de la meule s'est détaché, il n'est plus soumis à cette force, et ne se meut qu'en vertu de la vitesse qu'il possédait au moment où il s'est détaché.

§ 112. On se sert, dans diverses circonstances, de la force centrifuge pour produire un effet utile. Nous en verrons plusieurs exemples : mais pour le moment nous nous contenterons d'indiquer le principe.

On emploie, depuis quelques années, des machines à force centrifuge pour sécher promptement les tissus. La fig. 160 représente

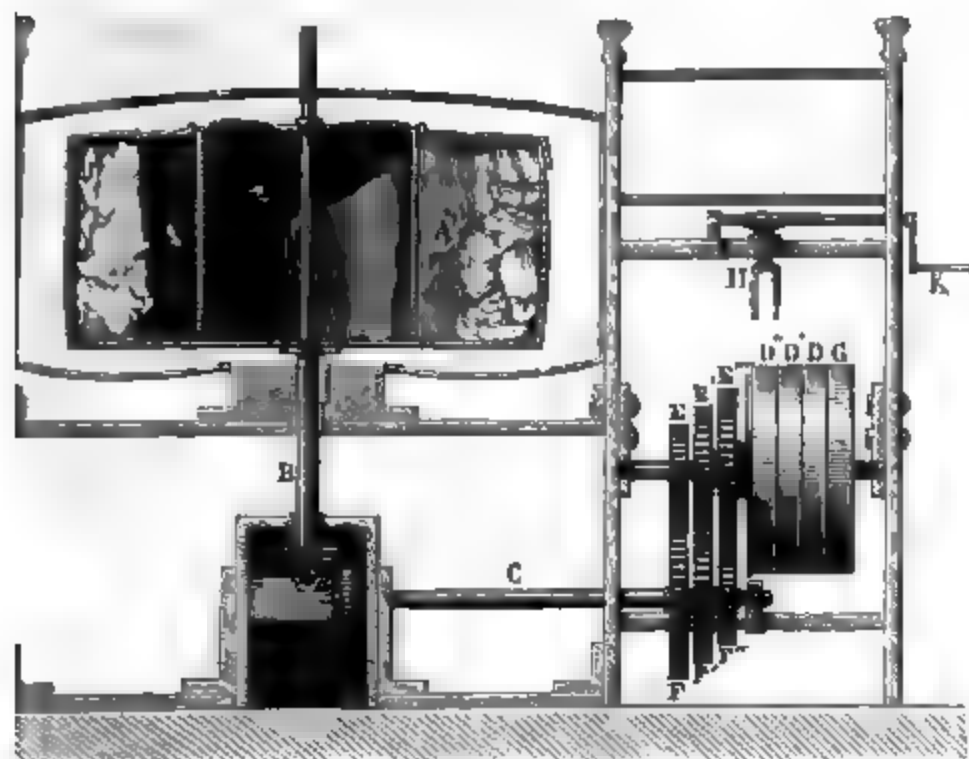


Fig. 160.

une machine de ce genre, telle qu'il en existe dans plusieurs des laboratoires publics de Paris. Un tambour en cuivre AA est destiné à recevoir le linge mouillé. Ce tambour est divisé, par une cloison cylindrique, en un compartiment central qui doit rester vide, et un

140 PRODUCTION DU MOUVEMENT PAR LES FORCES.

compartiment annulaire existant tout autour du premier, qui doit contenir le linge. Cette disposition est destinée à empêcher qu'on ne mette le linge trop près de l'axe du tambour. Un couvercle, qui s'enlève à volonté, permet d'introduire le linge, et lorsque le tambour est convenablement chargé, on remet le couvercle, en l'ajettissant fortement. Le tambour est traversé par un axe B, qui supporte seul, et avec lequel il peut tourner ; il est d'ailleurs dans un autre tambour, également en cuivre, qui est solidement fixé.

Pour sécher le linge, on fait tourner rapidement le tambour mobile ; on lui fait faire jusqu'à 4500 tours par minute. Ce mouvement de rotation développe une force centrifuge très grande sur chaque molécule du linge et de l'eau dont il est imprégné ; le linge est pressé fortement contre la paroi extérieure du tambour, l'eau est projetée par les petits trous dont cette paroi est criblée, et elle se réunit à la partie inférieure du tambour fixe, d'où elle s'écoule par un orifice pratiqué à cet effet. Lorsque le linge a été soumis à cette opération pendant 40 à 45 minutes, suivant les cas, il a perdu la presque totalité de l'eau qu'il contenait, et il suffit qu'il soit étendu à l'air pendant quelques instants, pour qu'il devienne tout à fait sec.

Le mouvement est transmis d'un axe horizontal C, à l'axe vertical B, par deux roues d'angle placées au-dessous du tambour ; il reçoit d'ailleurs son mouvement d'un autre axe qui lui est perpendiculaire et qu'une courroie sans fin fait tourner (voir § 58). Mais il s'agit de donner à l'axe C, et par suite à l'axe B, un mouvement très rapide et il y aurait des inconvénients graves à produire trop brusquement un pareil mouvement ; aussi la communication de l'axe sur lequel agit la courroie avec l'axe C, permet-elle de faire tourner successivement ce dernier axe avec des vitesses de plus en plus grande jusqu'à ce qu'on arrive à la vitesse qui convient à l'opération. Pour cela la courroie peut agir successivement sur diverses poulies D, D', D'', etc. La poulie D est fixée à l'axe qui porte la roue dentée E ; la poulie D' est fixée à un cylindre creux qui peut tourner librement sur l'axe de cet axe, et qui porte la roue E' ; et la poulie D'' est fixée à un second cylindre creux qui peut tourner autour du précédent, lequel porte la roue E''. La fig. 464, qui est une coupe, fait voir la disposition dont il s'agit. Lorsque la courroie agit sur la poulie D, cette poulie fait tourner la roue E, qui engrène avec la roue F fixée sur l'axe C ; en même temps, les roues F', F'' font tourner les roues E', E'', et par suite les poulies D', D'', etc. La communication du mouvement de la courroie à l'axe C se fait par les roues E, F, seulement, et est exactement la même que si les roues E', E'', F', F'', et les poulies D', D'' n'existaient pas. Lors-

passer la courroie de la poulie D à la poulie D', c'est la courroie fait tourner, et cette roue fait tourner l'axe

sur la roue F' :

nt est communiqué

a poulie D', et les

', existaient seules.

de la courroie passe

lie D'', le mouve-

transmis à l'axe C par

', F''. On voit donc

roie, marchant tou-

à même manière,

successivement la

se aux poulies D,

communiqué à l'axe

des croissantes, en

lancement du rap-

es rayons des roues

servent à effectuer

unication de mou-

de la poulie D, se

poulie folle G, sur

fait passer la cour-

on veut que l'axe C ne tourne pas. Une fourchette H,

se la courroie, est destinée à la maintenir sur l'une ou

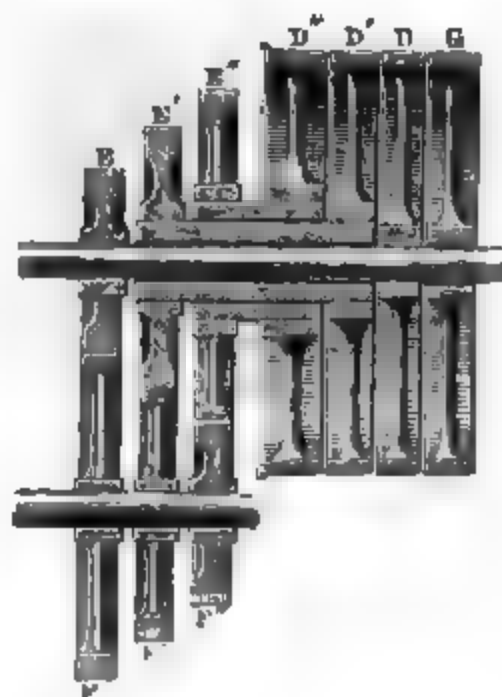


Fig. 141.

on veut que l'axe C ne tourne pas. Une fourchette H,

se la courroie, est destinée à la maintenir sur l'une ou

poulies. Lorsqu'on veut faire passer la courroie d'une

e autre, on fait marcher la fourchette, à l'aide d'une vis

ine par une manivelle K ; la tête de la fourchette est

écrou qui s'avance à droite ou à gauche, suivant qu'on

la manivelle K dans un sens ou dans l'autre ; la four-

l'ailleurs dirigée dans ce mouvement par une rainure

erse, et le long de laquelle elle doit se mouvoir.

a force centrifuge, qui est développée dans le mouvement

t uniforme d'un corps, n'a pas toujours la même inten-

rie avec la vitesse du corps, et aussi avec les dimen-

ele qu'il décrit. La mécanique rationnelle fait connaître

s variations, et voici en quoi elle consiste : La force

est proportionnelle au carré de la vitesse du corps, et

verse du rayon du cercle qu'il décrit. D'après cette loi,

tout en parcourant le même cercle, prend une vitesse

; 4 fois plus grande que celle qu'il avait, la force cen-

trifuge qui en résultera sera 4 fois, 9 fois, 16 fois plus grande qu'elle n'était auparavant ; si le corps décrit, avec une même vitesse, un cercle de rayon double, triple, quadruple du rayon du cercle qu'il décrivait d'abord, la force centrifuge se réduira à la moitié, au tiers, au quart de sa valeur primitive.

Dans le mouvement de rotation d'un corps solide autour d'un axe fixe, chacune de ses molécules décrit un cercle particulier, et il en résulte pour chacune une force centrifuge appliquée à cette molécule. La vitesse de cette molécule varie de la même manière que la vitesse angulaire du corps ; la force centrifuge qui se développe est donc proportionnelle au carré de cette vitesse angulaire. D'un autre côté, si l'on passe d'une molécule A à une molécule B située deux fois plus loin de l'axe de rotation que la première, la vitesse de cette molécule B sera le double de la vitesse de l'autre ; en sorte que, pour cette raison, la force centrifuge qui se développe en B doit être quatre fois plus grande que celle qui se développe en A. Mais, aussi, le rayon du cercle décrit par la molécule B étant le double de l'autre rayon, la force centrifuge doit être, en B, la moitié de ce qu'elle serait sans cette circonstance : donc, en définitive, la force centrifuge en B est seulement double de ce qu'elle est en A. D'après cela on peut énoncer la loi suivante : *Dans le mouvement de rotation d'un corps autour d'un axe fixe, les forces centrifuges, qui se développent aux différents points du corps, sont proportionnelles au carré de la vitesse angulaire, et aussi proportionnelles aux distances de ces divers points à l'axe de rotation.*

§ 144. *Transmission du mouvement dans les corps.* — Lorsqu'une force est appliquée à une partie d'un corps, le mouvement qu'elle produit se transmet ordinairement à toutes les autres parties ; mais cette transmission ne se fait pas instantanément. Si le corps était tout d'une pièce, s'il avait une figure rigoureusement invariable, il n'en serait pas ainsi : dès le moment que la partie soumise à l'action de la force céderait à cette action et se mettrait en mouvement, tout le reste du corps se mouvrait en même temps. Mais on doit se rappeler que les corps sont formés d'une multitude de molécules, qui sont placées à côté les unes des autres sans se toucher. Lorsqu'une force agit directement sur quelques unes de ces molécules, elles se mettent immédiatement en mouvement ; par là elles s'éloignent ou se rapprochent des molécules voisines ; l'équilibre qui existait entre les diverses parties du corps est troublé, et il en résulte le développement de forces moléculaires qui mettent ces molécules voisines en mouvement ; celles-ci déterminent à leur tour, et de la même manière, le mouvement des molécules qui les suivent, et le mouvement se

unique ainsi, de proche en proche, à toutes les molécules du

ordinairement cette communication de mouvement, dans les corps, est extrêmement rapide ; en sorte qu'on voit les choses se passer comme si les diverses molécules étaient attachées les unes aux autres d'une manière invariable. Mais, dans certains cas, la transmission du mouvement aux diverses parties d'un corps est très facile à apercevoir.

Supposons qu'un ressort, tel que ceux qui ont été décrits dans les §§ 17 et 18, soit attaché à un corps, et en fasse, pour ainsi dire, une partie intégrante : lorsqu'on voudra faire mouvoir le corps, en appliquant une force au ressort, on verra la partie du ressort qui est directement soumise à la force se mettre aussitôt en mouvement, le ressort se déformera, puis après un instant, le reste du corps sera entraîné.

C'est ce qui arrive encore lorsqu'un convoi de wagons, qui était au repos, commence à se mettre en marche. Les wagons sont attachés les uns aux autres par des chaînes qui aboutissent à des ressorts fixés sous les caisses. Deux wagons, ainsi réunis, sont habituellement en contact ; mais, si on cherchait à les écarter l'un de l'autre, en leur appliquant des forces assez grandes, les ressorts fléchiraient, et le contact cesserait d'avoir lieu. Dès que la locomotive, qui est en tête du convoi, exerce une force de traction sur le premier wagon qui la suit, elle le met en mouvement ; les ressorts par lesquels ce premier wagon est relié au second se tendent, et, au bout d'un instant, le second wagon commence à marcher ; les ressorts qui existent entre le second wagon et le troisième se tendent à leur tour, puis le troisième wagon est entraîné, et le mouvement se communique ainsi successivement à la totalité du convoi. Pendant le mouvement, les ressorts de jonction reprennent leur forme primitive, et les wagons se remettent en contact les uns avec les autres : le convoi se trouve alors disposé comme avant le départ, et peut être assimilé dans son ensemble à un seul corps solide en mouvement.

Ce qui se passe dans ce dernier exemple doit faire comprendre ce qui a lieu entre les diverses molécules d'un corps solide, et peut en donner, pour ainsi dire, une image excessivement agrandie. On voit, en effet, que les différents wagons jouent le rôle des molécules du corps qui se mettent successivement en mouvement ; et que les ressorts qui les unissent tiennent lieu des forces intérieures qui se développent entre ces molécules, et par lesquelles le mouvement se transmet de proche en proche.

§ 445. C'est ici le lieu d'entrer dans quelques détails sur les pressions qu'on éprouve, lorsqu'on est emporté par une voiture ou un bateau en mouvement.

Si le mouvement de la voiture ou du bateau était parfaitement régulier, on ne s'apercevrait nullement de sa marche, la vue des objets extérieurs, qu'on sait être immobiles, tels que des arbres, des maisons, serait indispensable pour qu'on pût reconnaître qu'on n'est pas en repos. Il n'y a donc, dans le mouvement dont on est animé, que les irrégularités de ce mouvement qui se fassent sentir distinctement.

Supposons qu'on soit assis dans une voiture, et qu'on aille en avant, c'est-à-dire qu'on ait la figure tournée du côté vers lequel la voiture marche. Si le mouvement de la voiture vient à s'accroître brusquement, cette accélération de mouvement se transmet d'abord aux parties inférieures du corps, qui sont immédiatement en contact avec la voiture, et le haut du corps, n'y participant pas de suite, se trouve rejeté en arrière. Si, au contraire, le mouvement de la voiture se ralentit brusquement, ce ralentissement se transmet encore aux parties inférieures du corps avant d'atteindre les parties supérieures, et le haut du corps se porte en avant, comme s'il avait reçu une impulsion. Lorsqu'on va en arrière, c'est-à-dire qu'on tourne le dos au côté vers lequel la voiture s'avance, les choses se passent d'une manière inverse. Une accélération brusque du mouvement fait incliner le haut du corps en avant ; tandis qu'un ralentissement brusque le fait incliner en arrière.

Un grand nombre de personnes éprouvent des nausées lorsqu'étant en voiture, elles vont en arrière : voyons si cet effet peut avoir une cause dans le mouvement lui-même. Lorsque le mouvement est parfaitement régulier, on ne s'en aperçoit pas ; les diverses parties du corps sont, les unes par rapport aux autres, exactement dans les mêmes conditions que si le corps était en repos : il est donc impossible que, dans ce cas, le sens du mouvement ait la moindre action sur les organes. La terre, dans son mouvement autour du soleil, est animée d'une très grande vitesse, puisqu'elle parcourt plus de 30 kilomètres en une seconde ; cependant nous ne distinguons pas si nous allons en avant ou en arrière lorsque nous nous tournons soit du côté de l'orient, soit du côté de l'occident. Il n'y a donc que les irrégularités du mouvement qui puissent occasionner le malaise que nous cherchons à expliquer. Mais, si nous réfléchissons à ce qui a été dit il n'y a qu'un instant, nous verrons que ces irrégularités se font sentir de la même manière, quel que soit le sens dans lequel on marche ; ce qu'une accélération

mouvement produit lorsqu'on va en avant, un ralentissement le produit de même lorsqu'on va en arrière. Or, dans le mouvement d'une voiture, des accélérations et des ralentissements de diverses grandeurs s'entremêlent en se succédant : en sorte qu'on doit conclure que les effets produits sur les organes sont les mêmes, soit qu'on aille en avant, soit qu'on aille en arrière. Il y a d'ailleurs une observation que bien des personnes ont pu faire : lorsque, pendant la nuit, on s'est endormi quelque temps dans une voiture fermée si elle est en mouvement, et qu'on se réveille, on ne peut pas distinguer le sens du mouvement de la voiture ; on a besoin de se rappeler la manière dont on s'est placé, pour savoir si l'on marche en avant ou en arrière. Les irrégularités du mouvement produisent donc exactement le même effet sur les organes, quel que soit le sens de la marche, puisqu'elles ne peuvent pas servir à faire reconnaître le sens.

On est obligé de conclure de ce qui vient d'être dit que, dans la marche en arrière, il n'y a pas de cause mécanique qui puisse occasionner des nausées. Ce qui les produit, c'est uniquement la vue des objets extérieurs. Lorsqu'on est accoutumé à aller en avant dans une voiture, les objets à côté desquels on passe semblent se déplacer d'une certaine manière ; si, contrairement à l'habitude qu'on a contractée, on se place dans une voiture de manière à aller en arrière, les objets qui sont au bord de la route sembleront alors se déplacer, mais autrement qu'à l'ordinaire, et il en résultera une espèce d'étourdissement, qui est la seule cause des nausées qu'on éprouve en pareil cas. Il suffirait donc de se soustraire, par un moyen quelconque, à la vue des objets extérieurs, pour faire disparaître la cause du malaise qu'on ressent, et par suite le malaise lui-même.

Nous venons de voir qu'il n'y a pas, dans la marche en arrière, de cause mécanique qui puisse agir sur les organes, par la raison que les secousses, les mouvements plus ou moins irréguliers qui sont transmis au corps par la voiture, sont les mêmes, quel que soit le sens dans lequel on marche ; mais, si le sens du mouvement ne peut rien produire, il peut y avoir, dans le mouvement lui-même, une cause mécanique de malaise. C'est ainsi que le mal de mer est occasionné par les balancements successifs que les vagues transmettent au navire sur lequel on se trouve. Dans ce mouvement de balancement, chaque molécule du corps, au lieu de se mouvoir en ligne droite, décrit une ligne sinueuse, telle que la ligne AB, *fig. 162*. À tout moment ou cette molécule se trouve dans l'une des parties inférieures de la ligne qu'elle est obligée de parcourir, en C, par

exemple, elle est à peu près dans les mêmes conditions que si elle se mouvait le long d'une circonférence de cercle $CC'C'$: il se déve-



Fig. 162.

loppe donc une force centrifuge qui détermine une pression de la molécule sur celles qui sont dans son voisinage. Un effet analogue se produit, lorsque cette molécule se trouve en D, dans une des parties supérieures

de la ligne AB; la force centrifuge qui s'y développe donne lieu à une pression dirigée en sens contraire de la précédente. Ainsi, par suite du balancement continu du navire, les organes qui sont à l'intérieur du corps exercent les uns sur les autres des pressions différentes de celles qui ont lieu à l'état de repos, pressions qui varient d'ailleurs continuellement et insensiblement d'un moment à un autre : on conçoit bien qu'il puisse en résulter un malaise, et c'est en effet ce qui occasionne le mal de mer.

§ 116. **Choc de deux corps.** — Lorsqu'un corps est en mouvement, et qu'il en rencontre un autre qui est en repos, ou qui n'a pas le même mouvement que lui, il se produit un *choc*. Nous allons examiner de quelle manière les mouvements des deux corps se trouvent brusquement modifiés par l'effet de ce choc.

Supposons, pour simplifier, qu'il s'agisse de deux corps sphériques A, B, *fig.* 163, qui se meuvent tous deux suivant une même ligne droite CD, et dans le même sens indiqué par la flèche. Pour qu'il puisse se produire un choc entre ces deux corps, il est nécessaire que la vitesse du corps A, qui est en arrière, soit plus grande que celle du corps B; s'il en est ainsi, le premier se rapprochera de plus en plus du second, et bientôt le choc aura lieu.



Fig. 163.

Au moment où le corps A atteindra le corps B, il tendra à faire marcher plus vite les premières molécules de ce corps, et cette accélération de mouvement se transmettra à toute la masse du corps B. Mais nous avons vu que la transmission du mouvement ne s'effectue pas instantanément : aussi en résultera-t-il une déformation dans le corps B. Les premières molécules atteintes céderont à l'impulsion qu'elles auront reçue; elles prendront une vitesse plus grande

celle du reste du corps, et se rapprocheront ainsi de son centre : les molécules voisines, poussées par les forces moléculaires qui se développeront, prendront, à leur tour, un mouvement plus rapide, et se rapprocheront aussi du centre du corps B. En sorte que, au bout d'un intervalle de temps qui est toujours extrêmement court, le corps B se trouvera aplati, dans l'endroit où le corps A l'aura atteint.

Mais ce qui a lieu pour le corps B a lieu de même pour le corps A.

Les molécules de celui-ci qui sont en avant, en rencontrant le corps B, qui est un obstacle à la continuation de leur mouvement, vont se ralentir brusquement : celles qui les suivent se ralentissent à leur tour, et le corps A s'aplatit comme l'autre, du côté par lequel le contact a eu lieu. La *fig. 164* montre en quoi consiste cet aplatissement simultané des deux corps, tout

l'exagérant, afin de le rendre plus sensible.

A partir du moment où les deux corps ont commencé à se toucher, ils se déforment de plus en plus, comme nous venons de le voir. Mais, en même temps, l'accélération de mouvement qui a été donnée aux premières molécules de B se transmet peu à peu à toute la

masse du corps, et le ralentissement des molécules de A qui sont en avant se communique également peu à peu à toute la masse de l'autre corps : la vitesse de A diminue, et la vitesse de B augmente. Tant que la vitesse du premier corps A, tout en diminuant, est plus grande que celle du second corps B, qui va en augmentant, la déformation continue à se produire, les corps s'aplatissent de plus en plus : mais aussitôt que les vitesses des deux corps sont devenues égales, la déformation n'augmente plus. Dès lors il se passera des choses différentes, suivant la nature des deux corps qui se sont choqués.

En premier lieu, si les corps A et B sont tout à fait dépourvus d'élasticité, ils ne tendront en aucune manière à reprendre leurs formes primitives : le choc sera terminé aussitôt qu'ils auront des vitesses égales, et, à partir de ce moment, ils se mouvront ensemble sans se séparer. C'est ce qui arrivera, par exemple, si les deux corps dont il s'agit sont deux balles de plomb.

En second lieu, si les corps A et B sont élastiques, si ce sont deux billes d'ivoire, par exemple, et que la déformation qu'ils ont éprouvée n'ait pas dépassé la limite de leur élasticité, le choc ne sera pas terminé au moment où leurs vitesses seront devenues égales. En effet, les deux corps tendent à revenir à la forme qu'ils avaient avant le



Fig. 164.

choc : les molécules de chacun d'eux, qui avaient été refoulées vers leurs centres respectifs, s'en éloignent pour se replacer comme elles étaient d'abord, et les deux corps se repoussent. La vitesse du corps A continue donc à diminuer, celle du corps B continue à augmenter, et bientôt les deux corps se séparent, en s'éloignant de plus en plus l'un de l'autre. Les choses se passent comme si un ressort à boudin avait été placé entre les deux corps au moment du choc, *fig. 163* :

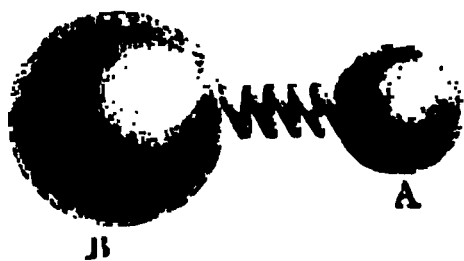


Fig. 163.

ce ressort, comprimé d'abord par l'excès de la vitesse du corps A sur le corps B, aurait cessé de se raccourcir lorsque les vitesses des deux corps seraient devenues égales ; puis, en se détendant, il aurait éloigné les deux corps l'un de l'autre, en augmentant toujours la vitesse de B et diminuant celle de A.

Pendant toute la durée du choc, la vitesse du corps B augmente constamment, et conserve conséquemment le même sens : mais il n'en est pas toujours de même du corps A. Après la première partie du choc, c'est-à-dire au moment où les deux corps ont la même vitesse, cette vitesse est dirigée dans le même sens que les vitesses initiales des deux corps : la vitesse du corps A a diminué, sans changer de sens. Mais, pendant la seconde partie du choc, la vitesse de ce corps, qui diminue toujours, peut devenir nulle, avant que le choc soit complètement terminé ; et le corps A, continuant à être repoussé du corps B par la réaction des molécules qui ont été déplacées, prendra un mouvement en sens contraire.

Des circonstances analogues à celles qu'on vient d'indiquer en détail se produiront dans le cas où les deux corps se meuvent en sens contraires, avant de se rencontrer ; et aussi dans les cas où un seul des deux corps est en mouvement avant le choc.

§ 147. Le changement que le choc apporte dans les vitesses des deux corps qui se sont rencontrés dépend de leurs masses respectives. A un moment quelconque, pendant que le choc se produit, il existe entre les deux corps une espèce de répulsion ; le corps B est soumis à une force qui tend à accélérer son mouvement, et le corps A à une force de sens opposé qui tend à ralentir le sien : ces deux forces sont égales et contraires, comme le seraient les pressions que les corps éprouveraient en même temps de la part d'un ressort à boudin qu'on aurait introduit entre eux. Mais ces deux forces, agissant sur des corps dont les masses sont généralement inégales, *produiront pas sur chacun d'eux des changements égaux de vites*

avons vu, § 94, que deux corps, sous l'action d'une même force, ou de deux forces égales, ce qui revient au même, acquièrent des vitesses inversement proportionnelles à leurs masses : si nous posons que la masse du corps B soit quatre fois plus grande que celle du corps A, pendant que la vitesse du corps B s'accroîtra de 1 décimètre par seconde, celle du corps A diminuera de 4 décimètres par seconde.

Admettons que, la masse du corps B étant toujours quatre fois plus grande que celle du corps A, la vitesse primitive de A soit 15^m par seconde, et celle de B de 10^m par seconde. Par l'effet du choc, la vitesse du premier se réduira à 11^m par seconde, et la vitesse du second s'élèvera à cette valeur. A ce moment le choc sera terminé, si les corps sont dépourvus d'élasticité, et ils se mouvront ensemble avec leur vitesse commune de 11^m. Si les corps sont élastiques, et que la limite de l'élasticité n'ait pas été dépassée, ils reprendront exactement la forme qu'ils avaient d'abord, il se développera par là, entre eux, des forces répulsives précisément égales à celles qui s'étaient développées pendant la première partie du choc. La vitesse du corps B augmentera donc encore de 4^m, et deviendra de 12^m par seconde; tandis que celle du corps A éprouvera une nouvelle diminution, égale à celle qu'elle a déjà éprouvée, et se réduira à une vitesse de 7^m par seconde.

Admettons encore que, A et B ayant les mêmes masses que précédemment, la vitesse initiale de A soit de 7^m par seconde, et celle de B de 2^m par seconde. Après que les deux corps auront atteint leur plus grande déformation, ils auront une même vitesse de 4^m par seconde; la vitesse du premier aura diminué de 4^m par seconde, et celle du second aura augmenté de 1^m seulement. Si les corps sont élastiques, et que la limite de l'élasticité n'ait pas été dépassée, la vitesse du corps B augmentera encore de 1^m pendant la seconde partie du choc, et deviendra de 4^m par seconde. Mais la vitesse du corps A, qui a déjà diminué de 4^m, et est ainsi réduite à 3^m par seconde, ne peut pas diminuer encore de 4^m : aussi sera-t-elle d'abord complètement détruite, puis le corps reprenant un mouvement en sens contraire, acquerra dans ce sens une vitesse de 1^m par seconde.

Ces deux exemples doivent faire comprendre comment les vitesses des deux corps seront modifiées par le choc, dans les différents cas qui pourront se présenter.

118. Des billes d'ivoire, présentant un grand degré d'élasticité, permettent de vérifier ce que nous venons de dire. Si l'on

150 PRODUCTION DU MOUVEMENT PAR LES FORCES.

suspend d'abord deux billes égales à côté l'une de l'autre, *fig. 166*, puis qu'on écarte l'une d'elles, A, de sa position d'équilibre, comme le montre la *fig. 167*, cette bille, en retombant, viendra

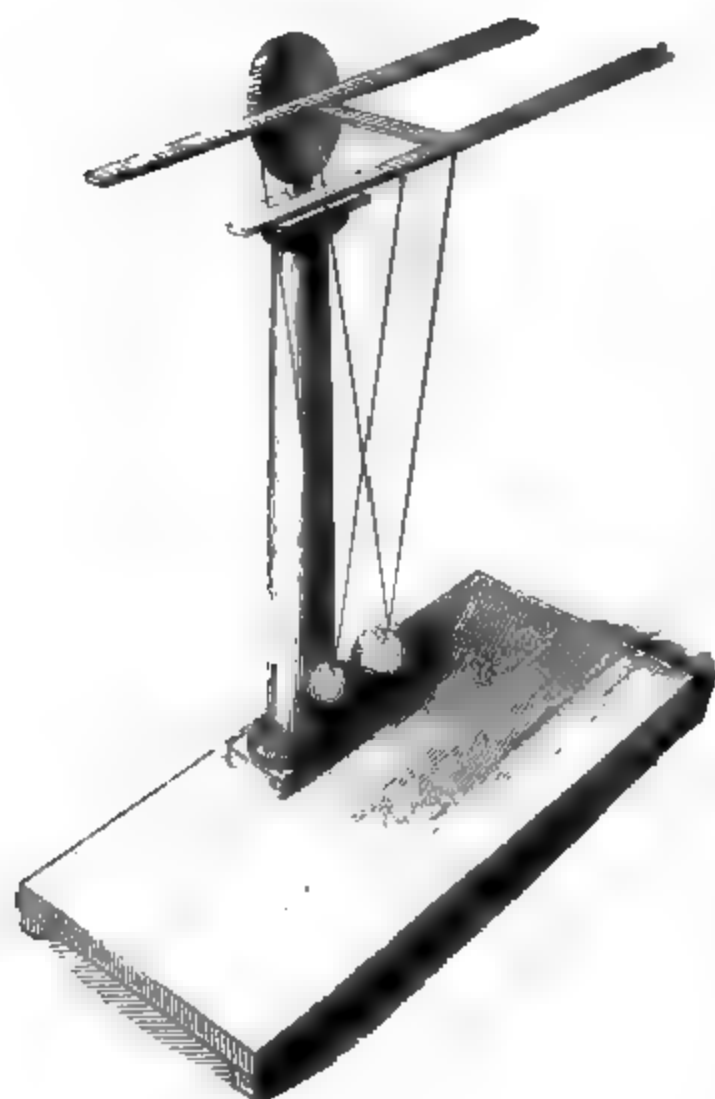


Fig. 166.

choquer l'autre. Au moment où le choc commence, la vitesse de la bille B est nulle ; d'ailleurs, les masses des deux billes étant les mêmes, la vitesse gagnée par l'une d'elles sera égale à la vitesse perdue en même temps par l'autre ; donc, au moment où les deux billes seront le plus déformées, elles auront chacune pour vitesse la moitié de la vitesse qu'avait la bille A au commencement du choc. Pendant la seconde partie du choc, la vitesse de la bille B augmentera autant qu'elle a augmenté pendant la première partie : c'est-à-dire qu'à la fin du choc, cette vitesse sera égale à la vitesse

primitive de la bille A : dans le même temps, la vitesse de la bille A, qui s'était déjà réduite de moitié, diminuera encore d'autant, et par suite elle deviendra tout à fait nulle. On doit donc observer, et l'on observe en effet, qu'au moment où le choc a eu lieu, la bille A reste immobile : et que la bille B, se mouvant sur un arc de cercle, monte à une hauteur égale à celle dont on avait laissé tomber la bille A. En s'élevant ainsi, la bille B a par là perdu complètement la vitesse qui lui avait été donné

elle redescend, sous l'action de la pesanteur, et vient frapper la bille A : alors elle s'arrête, la bille A remonte jusqu'à la hauteur à laquelle elle avait été laissée tomber précédemment, et le mouvement se continue ainsi indéfiniment, jusqu'à ce qu'il soit détruit par la résistance de l'air et les frottements.

On suspend deux billes de même poids, et on les fait prendre la position représentée par la fig. 167.

On laisse tomber la première bille, elle tombe et frappe la seconde, qui se met en mouvement, et va frapper la troisième, et ainsi de suite.

D'après ce qui vient d'être dit, on voit que la vitesse de la première bille, qui se trouverait par là réduite à zéro, se transmettra à la seconde, et ainsi de suite. On verrait de même que la vitesse passera de la seconde à la troisième, de la troisième à la quatrième, et ainsi de suite, jusqu'à ce qu'elle soit transmise à la septième, qui, ne rencontrant plus d'obstacle à son mouvement, se mouvra en tournant autour de son point de suspension. C'est en effet ce qu'on observe : si on laisse tomber la première bille d'une certaine hauteur, on la voit s'arrêter au point de suspension, et aussitôt la septième bille se met à tourner, et produit à son tour un choc, qui se transmet à la huitième, et ainsi de suite.

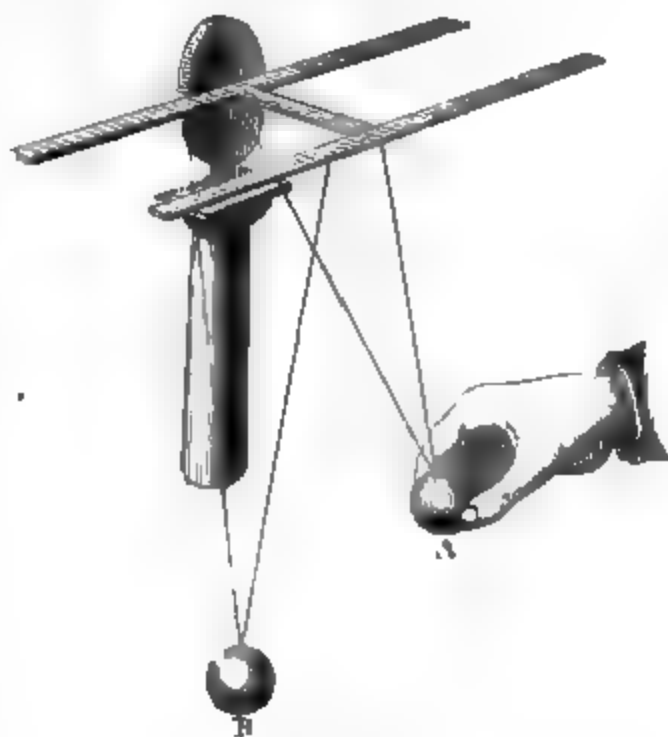


Fig. 167.

On voit donc que la vitesse de la première bille, qui se trouverait par là réduite à zéro, se transmettra à la seconde, et ainsi de suite. On verrait de même que la vitesse passera de la seconde à la troisième, de la troisième à la quatrième, et ainsi de suite, jusqu'à ce qu'elle soit transmise à la septième, qui, ne rencontrant plus d'obstacle à son mouvement, se mouvra en tournant autour de son point de suspension. C'est en effet ce qu'on observe : si on laisse tomber la première bille d'une certaine hauteur, on la voit s'arrêter au point de suspension, et aussitôt la septième bille se met à tourner, et produit à son tour un choc, qui se transmet à la huitième, et ainsi de suite.

154 PRODUCTION DU MOUVEMENT PAR LES FORCES.

D'après ce que nous avons vu dans le § 403, le corps A est regardé comme animé à la fois de deux vitesses, dont l'une est

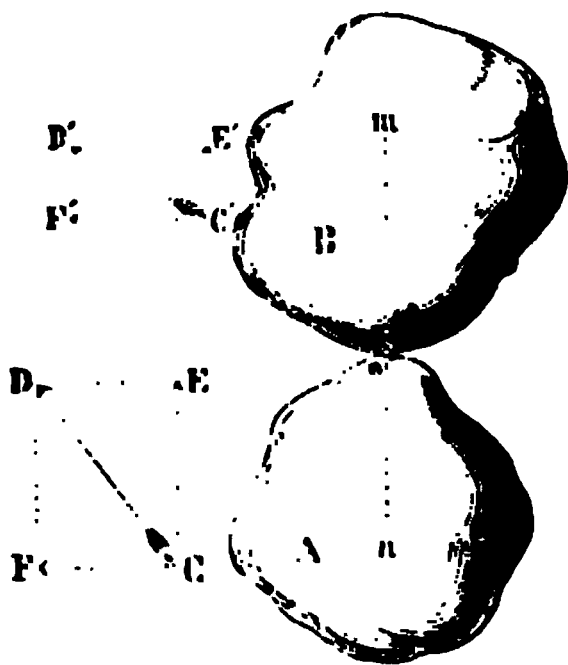


Fig. 169.

dirigée parallèlement à mn , et l'autre CF serait perpendiculaire à la précédente. On regardera le corps B animé d'une vitesse $C'E'$ parallèle à mn , et d'une autre vitesse qui lui est perpendiculaire.

Si les corps A et B, au moment où ils commencent à se rencontrer au point o , étaient animés de deux vitesses CF , $C'E'$, ils glisseraient l'un sur l'autre, et il n'y aurait pas de choc. Le choc ne peut donc résulter que des vitesses CE , $C'E'$, et non des vitesses CF , $C'E'$, faut-il, pour cela, que la vitesse CF soit plus grande que la vitesse $C'E'$.

En vertu de ces dernières vitesses, le choc se produira de la même manière que si elles existaient seules, et elles se trouveront déviées exactement de même, par l'action mutuelle des deux corps. Il suffira de composer les vitesses CF , $C'E'$, que le choc changera, avec les vitesses que les corps posséderont, parallèlement à mn , après la fin du choc, pour obtenir les vitesses définies des deux corps, au moment où ils se sépareront. Deux exemples du jeu de billard, feront voir comment on pourra réaliser ce qui vient d'être dit.

§ 420. Lorsqu'une bille, en mouvement sur un billard, vient rencontrer une autre qui était immobile, il se produit un choc. Nous allons voir dans quelles directions, et avec quelles vitesses les deux billes doivent se mouvoir après le choc.

Si la première bille se meut suivant une ligne droite dirigée vers le centre de la seconde, si elle vient la prendre *en plein*, il se produira le même effet que dans le choc de deux billes égales, l'une venant à côté l'une de l'autre, page 450 ; la première bille transmettra toute sa vitesse à la seconde, et restera immobile.

Mais si la première bille rencontre la seconde de côté, comme on le voit dans la fig. 170, où la ligne AB représente le chemin que la première bille vient de parcourir, les choses ne se passent pas de même. La vitesse BC de la première bille se décompose en deux vitesses BD et BE , dont l'une est dirigée suivant

deux billes, c'est-à-dire suivant la perpendiculaire à la bande, au point où elles se touchent, et l'autre suivant une direction perpendiculaire à la précédente.

Le choc se produira en vertu de la vitesse BD , comme on le voit dans la figure; et l'on sait que dans un pareil choc, entre deux billes de masses égales, c'est de la vitesse BD que la première bille se débarrasse complètement.

Après le choc, la première bille, ne possédant plus de vitesse BE , se déplace avec cette vitesse dans la direction BF ; et la seconde, au lieu de la vitesse BD , dé-
 BD

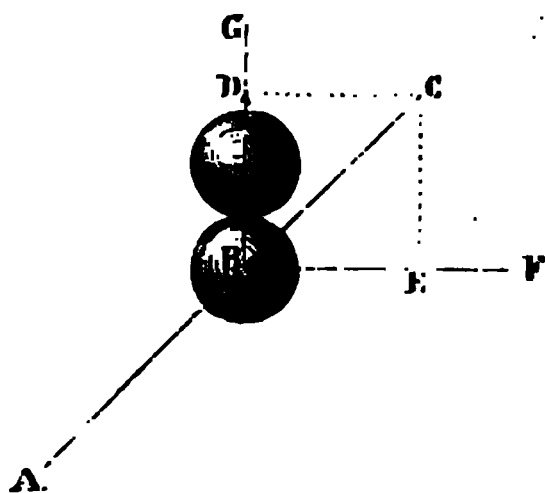


Fig. 170.

viendra BG . On voit que c'est la position du point par lequel la seconde bille est touchée, qui détermine les directions suivant lesquelles les deux billes se meuvent après le choc.

En second lieu, qu'une bille qui se meut suivant la direction BD , vienne rencontrer une des bandes du billard. La vitesse BC de la bille sera la vitesse BC de la bille.

On la décompose en deux composantes, l'une perpendiculaire à la bande, l'autre BE parallèle à la bande. Le choc aura lieu comme si la composante perpendiculaire existait seule. Comme la bande est élastique, ne peut résister au choc, la vitesse perpendiculaire sera détruite pendant la durée du choc; puis, au moment où la bille reprendra, en sens contraire, une vitesse égale à la précédente.

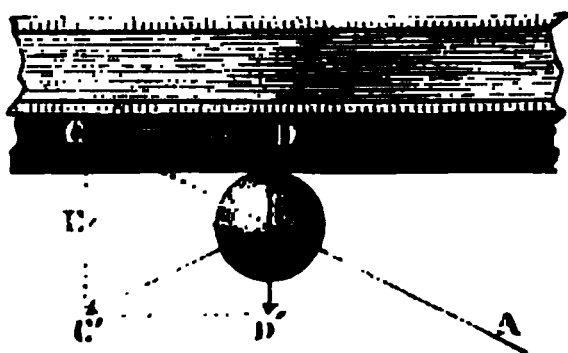


Fig. 171.

Pour trouver le mouvement de la bille, au moment où elle quittera la bande, il faut composer la vitesse BE , qui n'a pas été modifiée, avec la vitesse BC , et l'on trouvera la vitesse BC' , dont la bille sera animée; elle se mouvra suivant la direction de BC' . On peut observer ici que l'angle $C'BD'$ est égal à l'angle CBD , à cause de l'égalité des triangles dont ils font partie, les angles CBD , ABD' , étant opposés par le sommet, donc les angles ABD' et $C'BD'$ sont aussi égaux. C'est

ce qu'on énonce ordinairement en disant que l'angle d. (ABD') est égal à l'angle de réflexion ($C'DD'$).

§ 121. Lorsqu'un corps vient en choquer un autre, non vu que le mouvement ne se communique aux molécules de corps que de proche en proche, et qu'il en résulte une déformation de ce corps. Si le choc est faible, la déformation pourra ne passer la limite de l'élasticité, et le corps reprendra ensuite la figure qu'il avait auparavant. Mais si le choc est lent, il pourra en résulter une déformation permanente, ou une rupture; cela tient à ce que les premières molécules qui sent l'effet du choc prennent brusquement un mouvement qui les écarte notablement de leur position d'équilibre; ce mouvement se soit transmis aux molécules voisines. Or par là que la vitesse, plus ou moins grande, avec laquelle deux corps viennent choquer l'autre, pourra donner lieu à des effets très différents: c'est ce que quelques exemples feront comprendre.

Imaginons qu'une porte de bois ne soit retenue par rien qui l'empêche de tourner librement sur ses gonds. Si l'on y jette un boulet, et qu'on le lance, avec les mains, contre cette porte, elle produira un choc, qui fera tourner la porte, sans déformation bien sensible. Si, au contraire, le boulet était lancé avec un canon, il traverserait la porte, sans la faire tourner, en ne laissant avec lui seulement les parties qui étaient sur son passage: les molécules soumises immédiatement à l'effet du choc ont pris une telle vitesse, qu'elles se sont éloignées des molécules voisines avant que le mouvement ait pu se communiquer de la porte.



156. 121.

Une balle de plomb lancée légèrement à travers un carreau de fenêtre se voyait par le carré qu'il y ait rupture. Lancée plus fortement, elle traverse le carreau, en déterminant un trou rond, qui sera tout autour duquel elle aura passé. La balle est lancée

avec une arme à feu, elle ne fera dans le carreau qu'un trou rond par lequel elle passera; le reste du carreau sera intact.

Un boulet de canon vient à traverser obliquement une barre, de manière à rencontrer sur son chemin plusieurs bar-

produit successifs chocs : les effets des chocs successifs sont les mêmes. La fig.

représente ce qui a lieu quand le boulet rencontre la barre aux deux extrémités. Le boulet se trouve sur son chemin rompu net, comme-

ce : les parties qui sont pas déformées. Il n'y a pas de même du boulet : il a bien été déformé : le boulet, mais les parties restantes sont cour-

bées dans le sens du mouvement. La vitesse du boulet, par la rencontre du premier barreau, n'a pas pu se transmettre sur le second un choc si violent ; pendant la rencontre du boulet sur ce second barreau, le mouvement s'arrête de se commu-

ner en une plus grande vitesse, et c'est ce qui a déterminé la courbure des parties élevées.

L'effet produit dans le choc dépend aussi de la nature du corps qui reçoit le choc : plus le corps est dur, plus il aura une faible déformation ; plus il cédera facilement au choc ; s'il est mou, la déformation sera considérable, et il y aura résulté une rupture de la portion du corps qui a été directement.



Fig. 173.

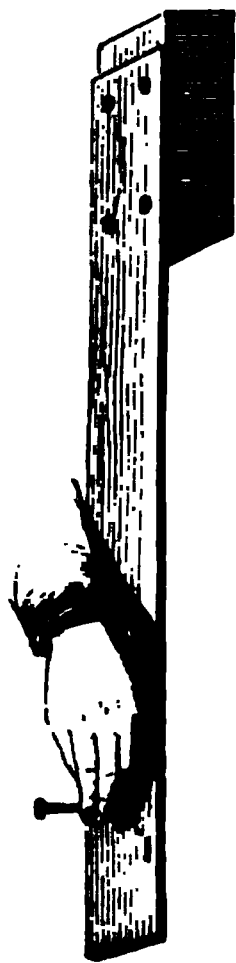
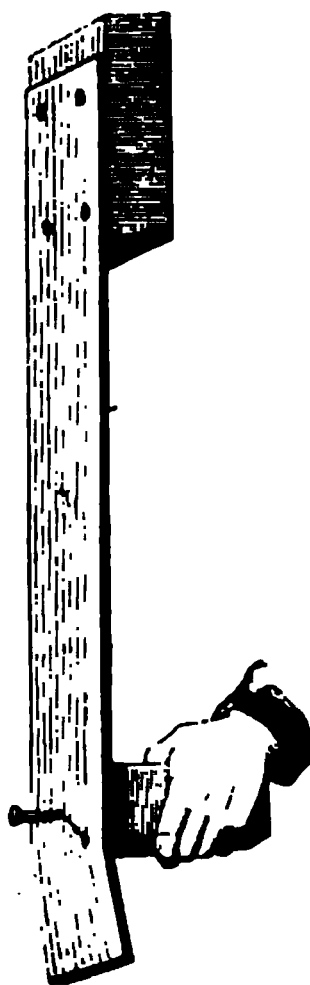


Fig. 174.



Lorsqu'on veut enfoncer un clou dans une planche qui n'est appuyée sur rien, *fig. 173*, la planche fléchit à chaque coup de marteau, et le clou n'entre pas : le mouvement se communique trop facilement à toute la partie de la planche, qui n'est pas appuyée. Mais le clou s'enfoncera si l'on vient à poser un morceau de bois derrière la planche, *fig. 174*, en le tenant avec la main sans l'appuyer. Pour que la planche pût fléchir à chaque coup de marteau, il faudrait qu'elle entraînât le morceau de bois placé derrière elle ; ce mouvement, produit par une même force, ne peut pas être aussi rapide que si le morceau de bois n'y était pas : aussi chaque coup de marteau donne-t-il lieu à une déformation de la planche, dans les points où le choc se transmet, et le clou s'enfonce. Dans cette opération, ce n'est pas la pression qu'il faut exercer du côté opposé à celui où l'on veut entrer le clou : mais c'est une masse qu'il faut placer derrière la planche, participant nécessairement au mouvement qu'elle reçoit, elle l'empêche de céder trop facilement à la force qu'elle reçoit.

DES RÉSISTANCES PASSIVES.

§ 123. Une machine est destinée à vaincre certaines résistances utiles, telles que le poids des corps qu'elle doit élever, la cohésion des molécules des corps qu'elle doit pulvériser, etc. Mais, en vaincant ces résistances utiles, en vue desquelles la machine est employée, elle produit toujours d'autres résistances, qui naissent de son mouvement, et qui, en s'opposant sans utilité à ce mouvement, consomment une portion plus ou moins grande de la force motrice. Ces résistances sont désignées, en général, sous le nom de *résistances passives*.

Les résistances passives sont de plusieurs espèces :

1^o Lorsqu'on cherche à faire glisser un corps sur une surface plane, on éprouve une certaine résistance ; il faut exercer une force pour déterminer le glissement, et aussi pour entretenir le mouvement, après l'avoir produit : cette résistance est appelée *résistance au glissement*, ou simplement *frottement*.

2^o Lorsqu'on cherche à faire rouler un corps cylindrique sur une surface plane, on éprouve encore une certaine résistance, produite, par exemple, dans le roulement des roues de voiture sur le sol : c'est ce que l'on nomme la *résistance au roulement*.

es cordes entrent dans la composition d'une machine, inévitablement leur objet, elles doivent présenter une *roideur*. Leur défaut de flexibilité donne lieu à des résistances sous le nom de *roideur des cordes*.

tes les machines se meuvent, soit dans l'air, soit dans les molécules d'air ou d'eau, qui se trouvent dans les voies mobiles, en reçoivent un mouvement qui ne peut être aux dépens de la force motrice de la machine. C'est ce qu'on appelle la *résistance des fluides*.

passer en revue successivement ces diverses espèces de résistances passives, et en indiquer les lois.

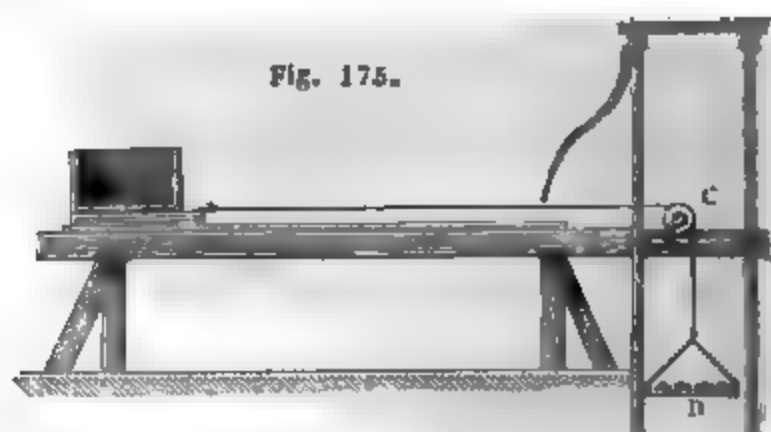
Frottement. — Lorsqu'un corps pesant repose sur une surface horizontale, sur une table, par exemple, et qu'on veut le faire glisser sur cette surface, on éprouve une résistance, entre les molécules du corps et de la table, une adhérence qui oppose à leur séparation, et cette adhérence n'est vaincue qu'en appliquant au corps une force de traction suffisamment grande. L'existence de cette force sert de mesure à la résistance au frottement.

On voit que le corps dont on vient de parler a commencé à se mouvoir, et qu'il a besoin, pour entretenir son mouvement sans que sa vitesse diminue, de lui appliquer constamment une certaine force. Cette force est employée tout entière à vaincre le frottement qui se développe entre le corps et la surface sur laquelle il glisse. Cette force, comme dans le cas précédent, sert de mesure à la résistance occasionnée par le glissement.

La traction qu'on a dû employer dans le premier cas n'est pas la même que celle qu'on a appliquée au corps dans le second cas. Elle est souvent plus grande. On doit donc distinguer deux sortes de frottement : le frottement au départ, et le frottement continu. L'un et l'autre ont été l'objet de recherches auxquelles nous allons indiquer.

Pour déterminer les lois du frottement au départ, Coult (en 1781) de l'appareil représenté par la *fig. 475*. On chargeait de poids à volonté, pouvait glisser sur des surfaces horizontales B, placées à côté l'une de l'autre; une corde qui passait dans la gorge d'une poulie C, descendant, et se terminait par un plateau D. Après avoir mis le corps A, il suffisait de mettre des poids dans le plateau D, inévitable pour que le mouvement commençât à se produire. Les poids mis dans le plateau, augmentés du poids du plateau, étaient la mesure de la force de traction qui avait

mis la caisse en mouvement, et par suite la mesure du frottement qui s'opposait à ce mouvement. On pouvait faire varier à volonté : 1^{re} la charge de la caisse A ; 2^{re} la nature des surfaces frottantes, en mettant sur les madriers, et fixant au-dessous de la caisse, les corps



de diverses espèces qu'on voulait soumettre à l'expérience ; 3^{re} enfin la grandeur des surfaces frottantes, en faisant varier l'étendue de la surface par laquelle la caisse s'appuyait.

Le même appareil a servi à Coulomb pour étudier les lois du frottement pendant le mouvement. Mais, dans ce cas, la détermination de la grandeur du frottement présentait plus de difficulté. Dès le moment que la caisse avait commencé à se déplacer, il fallait observer son mouvement, en reconnaître les lois, en mesurer la vitesse. Les moyens que Coulomb a employés pour cela manquaient de précision, et les lois du frottement qu'il a déduites de ses expériences n'étaient que très imparfaitement démontrées.

En 1831, M. Morin a repris les expériences de Coulomb, pour les faire sur une plus grande échelle, et avec plus d'exactitude. Il a cherché de nouveau les lois du frottement au départ, et celles du frottement pendant le mouvement : mais c'est surtout en vue de ces dernières qu'il a entrepris son travail. A cet effet, il a remplacé les moyens que Coulomb avait employés, par des moyens beaucoup plus précis, que nous allons indiquer.

La difficulté que présentent les recherches relatives au frottement pendant le mouvement consiste, comme nous l'avons déjà dit, à observer les lois du mouvement qui se produit sans l'action des poids placés dans le plateau D, *fig.* 175. Pour y arriver, M. Morin eut à l'axe de la poulie C un large disque de cuivre E, *fig.* 171, qui devait tourner en même temps qu'elle : il suffisait évidem-

FROTTEMENT.

ment d'étudier les lois du mouvement de ce disque, pour conclure celles du mouvement de la corde, et aussi de la caisse. Le disque fut, en conséquence, recouvert d'une feuille de papier, et un mécanisme d'horlogerie, qui pouvait donner un mouvement uniforme de rotation à un pinceau indube d'encre de Chine, fut disposé en avant du disque, de manière que la pointe du pinceau s'appuyât légèrement sur le papier, ainsi que le montre la *fig. 176*. Si la caisse *A* restait immobile, et que le mécanisme d'horlogerie fit marcher le pinceau, il est bien clair qu'il tracerait une circonférence de cercle sur le disque *E*. Mais si la caisse *A* est en mouvement, qu'en conséquence le disque tourne, le pinceau, mû par le mécanisme d'horlogerie, ne décrira plus de cercle sur la surface du disque : il décrira une ligne courbe qui dépendra à la fois du mouvement du pinceau et de celui du disque. Le mouvement du pinceau étant connu, on conçoit que la forme de la ligne courbe devra faire connaître le mouvement du disque, ce qu'on comprendra facilement si nous entrons dans quelques détails.



Fig. 1

Soit *ABC*, *fig. 177*, la courbe tracée sur le disque par le pinceau, et *Abe*, le cercle que le pinceau y aurait tracé, si le disque n'avait pas été mis en mouvement. Nous supposons que le pinceau, qui se meut uniformément, parcourt les arcs égaux *Ab*, *bc*, . . . , chacun en une seconde. Le pinceau étant au point *A*, lorsque le disque a commencé à se mouvoir. Au bout d'une seconde, le pinceau s'est trouvé en *b*, à ce moment il a marqué sur le disque, non pas le point *b*, mais le point *B*, qui est venu se placer sous sa



Fig. 177.

pointe, en vertu de la rotation du disque : le disque a donc fait de l'angle *AOB* pendant la première seconde. Au bout de deux secondes, le pinceau s'est trouvé en *c* ; il a fallu que le point *C* du disque vint se placer en *c*, pour être v

par le pinceau : donc, pendant les deux premières secondes, le disque a dû tourner de l'angle ϵOC . En continuant de la même manière, on trouvera les angles dont le disque a tourné pendant les trois premières secondes, pendant les quatre premières secondes, etc.

Dans toutes ses expériences, M. Morin a trouvé que les angles décrits par le disque, pendant la première seconde, pendant les deux premières secondes, pendant les trois premières secondes.... étaient entre eux comme les nombres 1, 4, 9, ..., c'est-à-dire qu'ils étaient proportionnels aux carrés des temps employés à les décrire. Les chemins parcourus par la caisse A, pendant les mêmes intervalles de temps, étaient donc aussi proportionnels aux carrés de ces intervalles de temps ; ou, en d'autres termes, le mouvement de la caisse A était de même nature que celui d'un corps qui tombe librement sous l'action de la pesanteur : c'était un mouvement uniformément accéléré (§ 86). L'angle dont le disque avait tourné pendant la première seconde faisait connaître la grandeur du chemin parcouru en même temps par la caisse ; le double de ce chemin était la vitesse acquise par la caisse, après une seconde de mouvement.

La force qui détermine le mouvement de la caisse A est le poids du plateau D et de ce qu'il contient ; mais cette force est détruite en partie par le frottement qu'éprouve la caisse en glissant : la portion restante de cette force donne lieu à l'accélération du mouvement. Cette accélération se produisant uniformément, on en conclut que l'excès du poids du plateau D, avec ce qu'il contient, sur le frottement de la caisse, a toujours la même valeur : ce frottement reste donc le même pendant toute la durée du mouvement.

Pour trouver la grandeur du frottement, on observera que l'expérience fait connaître la vitesse acquise par la caisse A, après une seconde de mouvement, ainsi que nous l'avons dit il n'y a qu'un instant. On pourra trouver (§ 93) la grandeur de la force capable de donner cette vitesse au corps formé de la réunion de la caisse A et du plateau D : si l'on retranche cette force du poids du plateau D, la différence sera la valeur du frottement qu'éprouve la caisse A.

§ 126. La comparaison des résultats obtenus dans un grand nombre d'expériences a conduit M. Morin à admettre, comme entièrement exactes, les lois suivantes, données par Coulomb.

Le frottement pendant le mouvement est :

1° Proportionnel à la pression qui s'exerce entre les deux corps qui frottent l'un sur l'autre ;

- *Indépendant de l'étendue des surfaces de contact ;*
- *Indépendant de la vitesse du mouvement.*

frottement au départ est, de même :

- *Proportionnel à la pression ;*
- *Indépendant de l'étendue des surfaces de contact.*

frottement au départ est le même que le frottement pendant le mouvement, lorsque les corps qui glissent l'un sur l'autre sont durs, comme les pierres et les métaux. Mais pour les corps compressibles, comme les bois, le frottement au départ est très notablement plus grand que l'autre. Lorsqu'on pose l'un sur l'autre deux corps, dont l'un est le moins compressible, et qu'on cherche ensuite à les faire glisser l'un sur l'autre, la résistance qu'on éprouve n'est pas toujours la même : elle varie, suivant que la durée du contact qui a précédé le glissement a été plus ou moins longue. Pour le glissement de bois sur bois, c'est après un contact de deux ou trois minutes, que le frottement au départ atteint toute son intensité ; pour le glissement de bois sur métaux, il faut un temps beaucoup plus long, qui va même jusqu'à plusieurs jours. Mais dès le moment que le contact des deux corps est suffisamment prolongé, le frottement au départ n'augmente plus avec la durée du contact.

Il peut paraître singulier que le frottement, soit au départ, soit pendant le mouvement, ne dépende pas de l'étendue des surfaces en contact : il semble au contraire, au premier abord, qu'il devrait être proportionnel à cette étendue : mais un raisonnement bien simple nous rendra compte de ce que l'expérience indique. Supposons deux corps, de même poids, s'appuyant sur un plan horizontal, par des surfaces de même nature et d'étendues différentes. La première sera, par exemple, double de la seconde. Lorsqu'on fera glisser ces deux corps sur le plan, le premier frottera par deux fois plus de points que le second. Mais aussi, son poids se répartissant sur deux fois plus de points d'appui, on peut regarder les pressions qui résultent, sur chacun de ses points, comme étant moitié moindres que les pressions correspondantes, produites par le second corps : le frottement sera donc aussi moitié moindre en chaque point qui frotte, et, en conséquence, si le nombre des points frottants est grand, le frottement, en chacun de ces points, est plus faible, dans le même rapport, et cela se compense exactement.

Malgré l'égalité de pression, le frottement varie beaucoup, suivant la nature des surfaces qui glissent l'une sur l'autre. Voici quelques résultats d'expérience qui pourront donner une idée de la grandeur du frottement qui se développe dans les différents cas.

| INDICATION
des surfaces en contact. | RAPPORT
du frottement à la p | |
|--|---------------------------------|-------------------------|
| | au départ. | P ₁
lemon |
| Bois sur bois, sans enduit, moyennement | 0,50 | (|
| » avec enduit de savon sec <i>id.</i> | 0,36 | (|
| » avec enduit de suif. . . <i>id.</i> | 0,19 | (|
| Bois sur métaux, sans enduit . . . <i>id.</i> | 0,60 | (|
| » avec enduit de suif. . . <i>id.</i> | 0,19 | (|
| Courroie sur bois, sans enduit. . . <i>id.</i> | 0,63 | (|
| » mouillée d'eau. <i>id.</i> | 0,87 | (|
| Métaux sur métaux, sans enduit. . <i>id.</i> | 0,18 | (|
| » avec enduit d'huile d'olive <i>id.</i> | 0,12 | (|

§ 127. **Résistance au roulement.** — Lorsqu'on cherche à rouler un corps cylindrique sur une surface plane et horizontale, on éprouve une résistance : cela provient de la déformation que

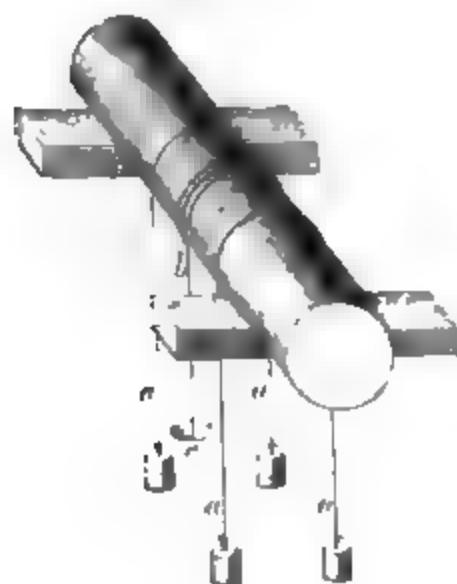


Fig. 178.

vent le corps et la surface sur laquelle il s'appuie, en raison de la pression qui s'exerce au point de contact. Le cylindre, en roulant sur la surface qui le supporte, prime en forme de sillon, produisant le roulement, il faut ainsi dire, à chaque instant monter le cylindre sur une surface inclinée.

Coulomb a fait également des expériences, pour déterminer les lois de cette résistance au roulement. Il s'est servi, pour cet effet, du moyen suivant. Deux cylindres horizontaux, placés à côté l'un de l'autre, laissent entre eux un espace vide, fig. 178. un cylindre est posé transversalement sur ces deux

pression qu'il exerçait pouvait être augmentée à volonté, à l'aide de ficelles *a, a*, portant des poids égaux à leurs extrémités ;

enroulée au milieu du rouleau, se terminait par un plateau lequel on pouvait mettre différents poids. Dans chaque expérience, Coulomb mettait dans le plateau *c* des poids suffisants pour vaincre le roulement : ces poids pouvaient servir de mesure de la résistance au roulement.

En un temps très court, on peut regarder le corps qui roule tournant autour de la ligne droite par laquelle il s'appuie. La force dont nous nous occupons s'oppose à ce que cette rotation se produise, et le corps ne peut se mouvoir qu'au point d'appui.

La force *P*, fig. 179, fait équilibre à cette résistance : on la suppose appliquée à l'extrémité du bras de levier *AB*. On pourrait faire équilibre autrement, en appliquant le poids *P* par un bras *Q* qui tirerait le rouleau horizontalement au point d'appui à l'aide d'une corde sur une poulie : ce poids *Q* agissant sur un bras de levier *AC*, qui est double

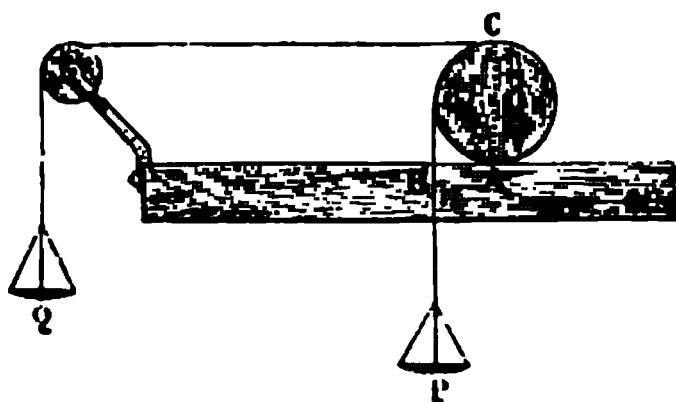


Fig. 179.

de longueur, ne levra n'être que la moitié de *P*, pour mettre le rouleau en équilibre, puisque la résistance à vaincre est la même dans les deux cas. Une force qui agirait sur un bras de levier autre que *AB* et qui ferait équilibre à la même résistance au roulement, aurait une valeur différente de *P* et de *Q*, qui dépendrait de la longueur de son bras de levier. Il résulte des expériences de Coulomb que la force capable de vaincre la résistance au roulement, est proportionnelle à la pression, et dépendante du diamètre du rouleau.

La force varie d'ailleurs suivant la nature de la surface sur laquelle le rouleau roule, et de celle du plan sur lequel se produit le roulement.

Il est bien évident que, si la force qui détermine le roulement, agit toujours sur un même bras de levier, était dans tous les cas appliquée horizontalement au centre du rouleau, ou bien au point supérieur de son diamètre vertical, elle serait inversement proportionnelle à ce diamètre.

3. **Roldeur des cordes.** — On peut se rendre compte de la manière dont la résistance occasionnée par la roideur des cordes varie avec leur épaisseur et leur longueur.

On peut se rendre compte de la manière dont la résistance occasionnée par la roideur des cordes varie avec leur épaisseur et leur longueur. On peut se rendre compte de la manière dont la résistance occasionnée par la roideur des cordes varie avec leur épaisseur et leur longueur.

On peut se rendre compte de la manière dont la résistance occasionnée par la roideur des cordes varie avec leur épaisseur et leur longueur.

deur des cordes. Il est clair d'abord que cette résistance, pour enrouler une corde sur une poulie ou sur un tour, pour lui donner la courbure convenable à cet enroulement, employer une certaine force; une portion de la puissance appliquée à la machine sert à produire cet effet, et est entièrement perdue, puisqu'elle ne peut vaincre aucune résistance utile. Mais on peut l'expliquer encore en observant que les deux brins de la corde ne sont pas exactement dans les mêmes conditions. Le brin qui descend ne prend pas brusquement la courbure de la poulie; il se courbe progressivement, et il en résulte que la portion de ce brin qui est rectiligne n'est pas dirigée suivant une tangente à la circonférence de la poulie, *fig. 180*. La direction de la force résistante,

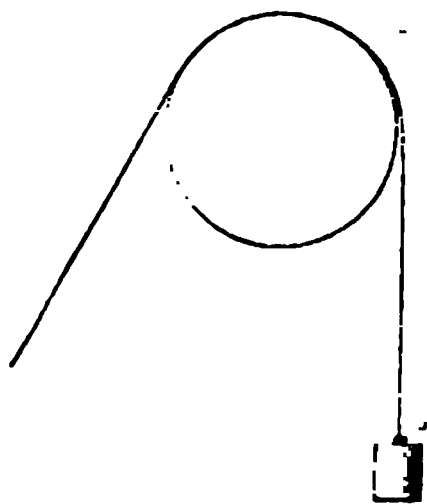


Fig. 180.

la puissance doit faire équilibre, plus loin du centre de la poulie la corde était parfaitement flexible, la force agit sur un plus grand levier, et il en résulte que la puissance doit être plus grande qu'elle n'aurait été si la corde était parfaitement flexible.

La portion de la puissance absorbée par l'effet de la roideur de la corde augmente en même temps que la longueur de la corde; mais elle n'augmente pas proportionnellement à cette longueur; elle varie d'ailleurs avec la nature et l'épaisseur de la corde.

Les courroies sans fin, qui passent sur des tambours, donnent lieu à des résistances du même genre.

§ 129. **Résistance des fluides.** — Lorsqu'un corps se meut dans un fluide, il éprouve, de la part de ce fluide, une résistance qui tend constamment à diminuer sa vitesse; comme nous l'avons déjà dit, à ce que le corps communique du mouvement aux molécules du fluide qu'il rencontre.

Si l'on compare cette résistance à celle qui est occasionnée par le frottement, on verra qu'elles sont essentiellement différentes. Lorsqu'on cherche à faire glisser un corps sur une surface, on éprouve une résistance avant que le mouvement ait commencé; cette résistance subsiste pendant le mouvement; mais elle est très souvent moindre qu'elle n'était d'abord. Elle ne varie pas d'ailleurs avec la vitesse du corps qui glisse.

Il n'en est pas de même de la résistance des fluides. Lorsque le corps qu'on considère n'est pas en mouvement, elle est nulle; elle augmente avec la vitesse du corps, et elle est

atir : elle ne se développe que pendant le mouvement, et beaucoup à mesure que le mouvement s'accélère.

us reviendrons plus tard sur cette résistance que les fluides ont aux corps qui se meuvent à leur intérieur. pour le moment, nous nous contenterons de dire qu'elle est proportionnelle : 1^{re} à l'étendue de la surface qui vient directement choquer les molécules fluides ; 2^e au carré de la vitesse avec laquelle ce choc se fait. Elle est d'ailleurs beaucoup plus grande dans l'eau que l'air.

Le petit appareil représenté par la *fig. 181*, on peut montrer

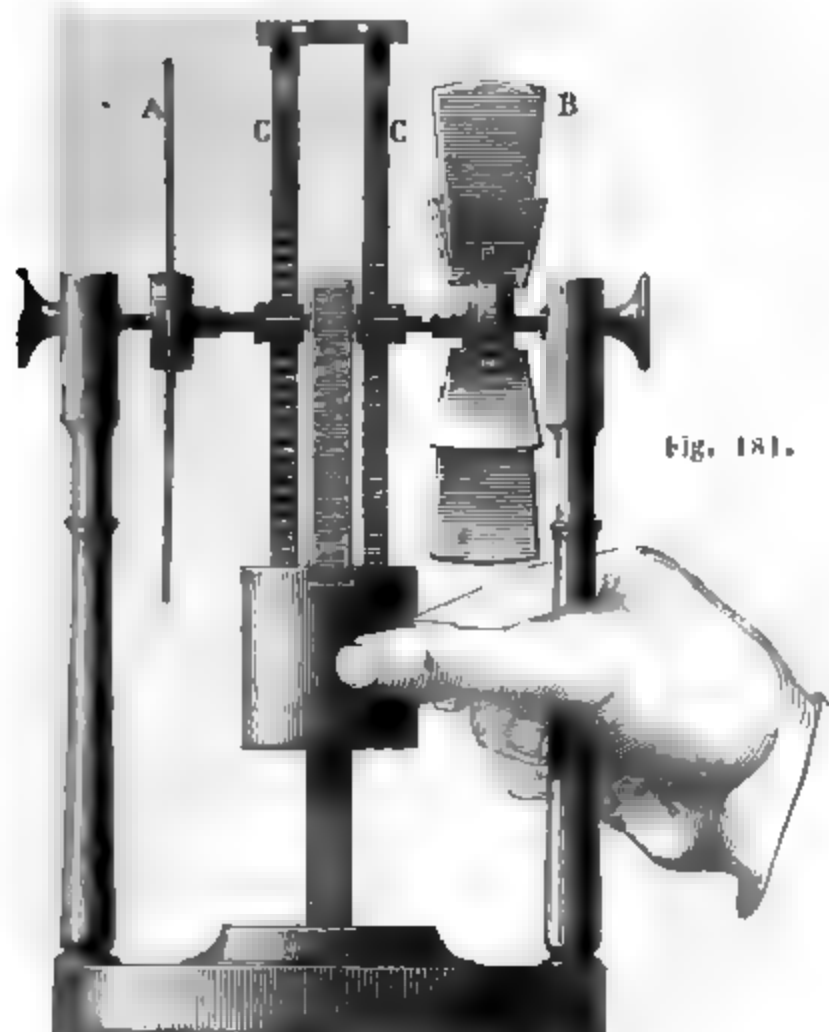


fig. 181.

la résistance des fluides croît en effet, lorsqu'on augmente l'étendue de la surface qui rencontre directement les molécules liquides ou gazeuses. Deux petites roues *A, B*, sont montées chacune sur un axe particulier, et sont extrêmement mobiles autour de ces deux

168 MACHINES A L'ÉTAT DE MOUVEMENT NON UNIFORME.

axes. Deux crémaillères, fixées l'une à l'autre, engrènent avec pignons de mêmes dimensions, que portent les axes des roues : en sorte que, si l'on abaisse rapidement les deux crémaillères, en agissant comme l'indique la *fig. 481*, jusqu'à ce qu'elles n'engrènent plus avec les pignons, qui pourront tourner librement dans les échancrures C, C, on communique aux deux petites roues exactement la même vitesse de rotation. Chacune des deux roues est formée de quatre ailettes. Dans la roue A, les ailettes sont fixes à l'axe, et viennent rencontrer l'air seulement par leur tra- vers. Dans la roue B, au contraire, les ailettes sont mobiles : elles peuvent être placées de la même manière que celles de la roue A, ou bien être inclinées plus ou moins sur la direction du mouvement ; elles peuvent même être disposées de manière à rencontrer l'air de face, pendant qu'elles tourneront. Lorsque les ailettes de la roue B sont mises dans la même position que celles de la roue A, et qu'on fait tourner les deux roues à l'aide des crémaillères, on les voit se mouvoir pendant un temps très long, et s'arrêter à très peu de distance l'une comme l'autre : mais si les ailettes de la roue B sont disposées autrement, comme dans la *fig. 481*, le mouvement de cette roue se ralentit bien plus vite que celui de l'autre roue, et ce ralentissement est d'autant plus marqué, que les ailettes se rapprochent plus de rencontrer de face les molécules d'air qui sont sur leur passage.

ÉTUDE DES MACHINES A L'ÉTAT DE MOUVEMENT NON UNIFORME.

§ 130. Lorsqu'une machine est en mouvement, et qu'elle est soumise à des puissances et des résistances qui se font équilibre, son mouvement est uniforme. Mais il en est rarement ainsi, même des machines, en grand nombre, pour lesquelles cela ne peut jamais avoir lieu ; c'est ce que l'on comprendra aisément à l'exemple suivant.

On emploie souvent, pour faire tourner une meule à aiguiser, la disposition représentée sur la *fig. 482*. L'axe de la meule est mis en mouvement par une manivelle ; de l'extrémité de la manivelle part une bielle, qui descend à peu près verticalement, et dont la partie inférieure se relie à l'extrémité d'une pédale. La bielle est attachée d'une part avec la manivelle, d'une autre part avec la pédale. On fait tourner la meule, en agissant directement sur elle avec la pédale ; on verra la manivelle tourner, la bielle monter et descendre.

la pédale, et l'appuie
moment où la bielle
rasque la bielle re-
ne retire pas son
l le soutient, pour
ce pas de pression
s. En même temps
ent ainsi le mouve-
meule, il appuie

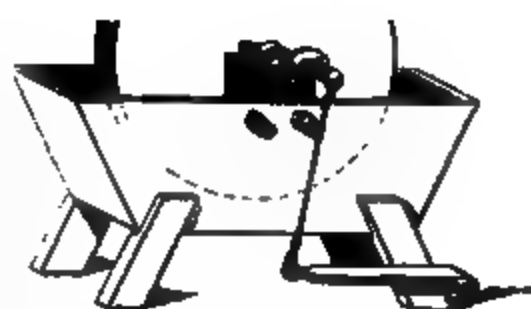


Fig. 182.

ce le corps tranchant qu'il veut aiguiser.
é de reconnaître qu'un pareil mouvement ne peut pas
se. Si l'on examine ce qui se passe pendant un tour
meule, en commençant au moment où la pédale occupe
la plus élevée, on verra que le pied n'agit que pendant la
moitié de ce tour, et qu'il cesse complètement d'agir pen-
dant la seconde moitié. La résistance, au contraire, qui est occa-
sionnée par le frottement du corps qu'on aiguiser, continue son
action de la même manière à peu près régulier pendant
le tour entier. Ainsi, pendant la seconde moitié du tour, il ne
peut pas avoir d'équilibre entre la force motrice et la
résistance, puisque la force motrice est nulle, et que la résistance
est constante. Dans la première moitié, l'équilibre n'existe qu'à deux



sur lequel agit la puissance, varie d'un moment à l'autre. Le bras de levier, nul d'abord, lorsque la bielle commence à descendre, augmente jusqu'à devenir égal à OM : puis il diminue, et redevient nul lorsque la bielle est sur le point de remonter. La puissance, sur un bras de levier qui varie à chaque instant, ne peut constamment équilibrer la résistance. Mais si ce bras diminue pendant qu'il augmente, atteint une valeur pour laquelle il a lieu, il repassera par la même valeur lorsqu'il diminuera : que la puissance fera deux fois équilibre à la résistance, pendant le mouvement descendant de la bielle, qui occupera, à ces deux moments, des positions telles que MN , $M'N'$, *fig.* 183.

Tant que l'extrémité de la manivelle est située entre le pôle et le point M' , la puissance agit sur un bras de levier plus grand que celui qui convient à l'équilibre ; une portion de la puissance est perdue pour vaincre la résistance, et l'autre portion donne lieu à une accélération du mouvement de la meule. Mais si, pendant qu'elle descend, l'extrémité de la manivelle se trouve au-dessus du pôle ou au-dessous du point M , la puissance, ayant un bras de levier plus faible, ne peut plus faire équilibre qu'à une portion de la résistance ; l'autre portion ralentit le mouvement. Pendant que la bielle descend, le mouvement se ralentit aussi constamment, puisque la puissance est plus soumise qu'à la résistance. On voit donc que la vitesse de la meule augmente pendant tout le temps que la manivelle va de M en M' , et qu'elle diminue pendant que la manivelle va de M' en M . La meule a sa plus petite vitesse lorsque la manivelle est en M , et sa plus grande vitesse lorsqu'elle est en M' .

§ 431. Il y a beaucoup d'ateliers dans lesquels une machine motrice, une machine à vapeur, par exemple, fait un grand nombre de machines-outils, telles que des scies, des machines à raboter, à percer, etc. Habituellement ces machines ne fonctionnent pas toutes à la fois. Elles reçoivent leur mo-

acc est trop grande pour qu'il y ait équilibre, le mouvement s'accélère dans toutes les parties de l'atelier qui communiquent avec elle; le mouvement se ralentit au contraire lorsque la puissance est trop faible relativement aux résistances qu'elle a à vaincre.

32. Des volants. — Il est important, dans la plupart des cas, d'uniformiser autant que possible le mouvement des machines, afin que la vitesse de chaque pièce n'augmente pas, ou ne diminue pas, au-delà de certaines limites. Voici comment on y parvient.

Le mouvement d'une machine s'accélère, lorsque la puissance excède sur les résistances à vaincre. Mais l'accélération produite par un même excès de puissance peut être très différente, suivant la nature et la disposition des pièces qui y participent. Si l'on fixe à une machine des corps massifs qui doivent se mouvoir avec elle, et les dispose surtout de telle manière qu'ils aient habituellement une grande vitesse, on rendra la machine beaucoup moins sensible à l'action de toute force accélératrice. La quantité de mouvement produite par cette force devant se répartir entre toutes les pièces qui se meuvent ensemble, chacune d'elles en recevra une portion d'autant plus faible qu'on aura donné plus d'importance à sa propre vitesse additionnelle.

La présence de ces grandes masses inertielles a pour effet d'uniformiser l'accélération de mouvement, et de ne pas lui faire résulter de grandes variations de la puissance sur les résistances.

De même, si la puissance vient à être insuffisante pour faire vaincre aux résistances, l'excès de ces masses ralentira le mouvement de la machine; mais ce ralentissement se fera beaucoup moins sensible que la machine

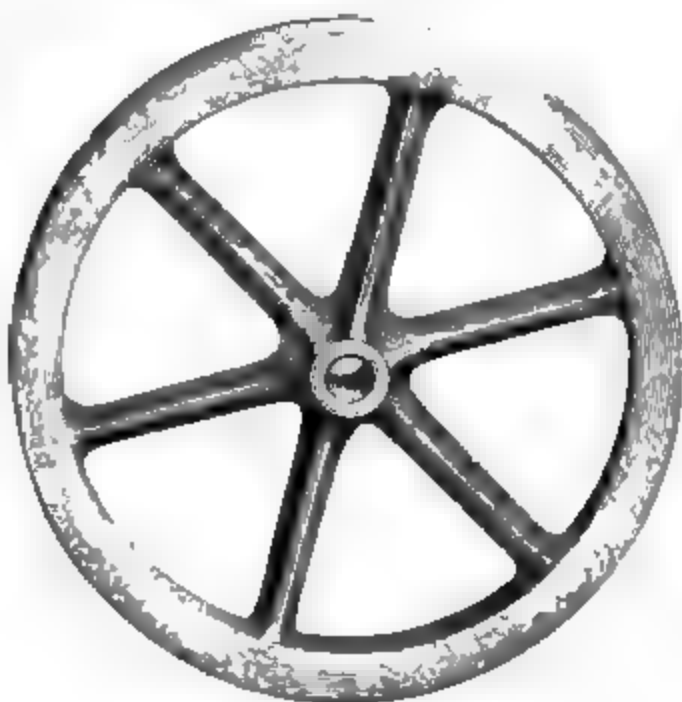


Fig. 184.

pourvue de masses additionnelles dont on vient de parler. On donne ordinairement à ces masses additionnelles la forme de roue, comme celle qui est ici représentée, fig. 184. Cette

172 MACHINES A L'ÉTAT DE MOUVEMENT NON UNIFORME.

roue, montée sur un arbre tournant, participe au mouvement de rotation de l'arbre : pour une même vitesse angulaire, les molécules qui sont à la circonférence ont un mouvement d'autant plus rapide que la roue a un plus grand diamètre. Une pareille roue prend le nom de *volant*.

Quelquefois, au lieu d'une roue, on adapte à l'un des arbres tournants de la machine deux ou trois rayons terminés par des masses de fonte, *fig. 185 et 186*. On donne à ces masses la forme de len-

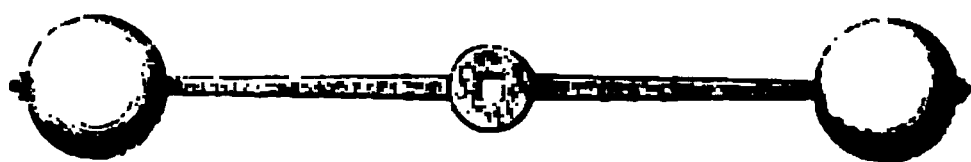


Fig. 185.

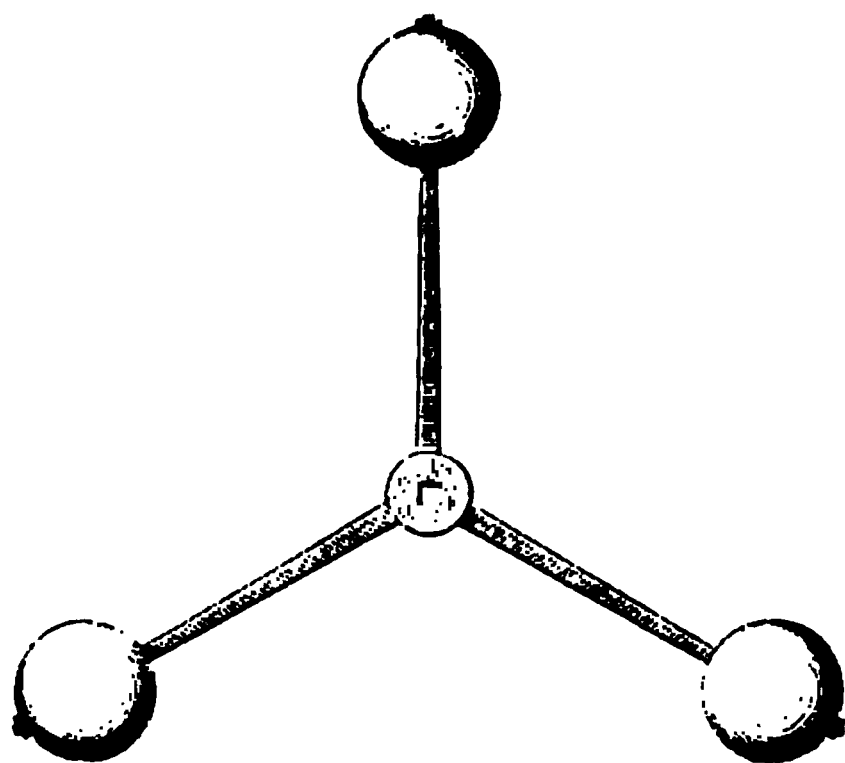


Fig. 186.

tilles, pour diminuer la résistance que l'air oppose à leur mouvement, résistance qui pourrait être très grande, en raison de la grandeur de leur vitesse. Ces masses lenticulaires sont d'ailleurs disposées de telle manière que le centre de gravité de l'espèce de volant qu'elles forment soit situé sur l'axe de rotation de l'arbre.

L'addition d'un volant à une machine ne nécessite pas l'emploi d'une plus grande puissance pour entretenir son mouvement. Que la machine soit munie ou non d'un volant, si les résistances à vaincre sont les mêmes, on devra employer la même puissance. Le volant n'a d'autre effet que de resserrer les limites entre lesquelles peut varier la vitesse de la machine, suivant que la puissance l'emportera sur les résistances, ou inversement.

Pour être exactement dans le vrai, nous devons dire cependant que, quand on adapte un volant à un arbre tournant, le poids du volant détermine une plus grande pression de l'arbre sur ses supports : il en résulte donc des frottements plus grands que si le volant n'existait pas, et la puissance qui est appliquée à la machine doit être

en conséquence, pour pouvoir vaincre ces frottements. Cette raison seulement que l'addition d'un volant à une machine nécessite l'emploi d'une plus grande puissance; mais l'augmentation qui en résulte est tellement faible, qu'on peut la négliger. Pour augmenter la puissance d'un volant, soit en augmentant sa masse, sans changer sa forme, soit en lui donnant de plus grandes dimensions, sans faire entrer plus de matière dans sa composition, c'est ce dernier moyen qu'on emploie de préférence, afin d'éviter d'augmenter le volant trop lourd, et par suite de ne pas trop augmenter le poids qui doit le supporter. Aussi voit-on habituellement que les machines un peu puissantes sont munies de volants de très grandes dimensions. Il y a cependant une limite qu'on ne doit pas dépasser : si l'on agrandissait un volant outre mesure, sans augmenter son poids, sa circonférence ne présenterait plus une solidité suffisante et pourrait être brisée par la force centrifuge qui se développe pendant son mouvement de rotation (§ 411).

Régulateur à force centrifuge. — Un volant régulièrement agit sur le mouvement d'une machine, en empêchant que les inégalités qui existent dans l'action de la puissance et des résistances ne produisent une trop grande accélération, ou un trop grand ralentissement de la machine; mais il y a beaucoup de circonstances dans lesquelles il ne peut rien faire. Si les résistances que la machine doit vaincre augmentent trop, l'effet du volant est de diminuer très notablement la vitesse, et que la puissance se trouve étant trop grande pour leur faire équilibre, le mouvement de la machine s'accroît constamment. Le volant pourrait bien empêcher que la vitesse n'accroisse trop rapidement; mais, malgré son action, elle continuera à augmenter sans cesse, et pourrait devenir excessivement grande, occasionnant de graves inconvénients, dont le moindre serait l'arrêt du travail de la machine. Si, au contraire, les résistances diminuent de manière que la puissance ne fût, à aucun instant, suffisante pour leur faire équilibre, le mouvement de la machine se ralentit de plus en plus, malgré la présence du volant, qui ne ferait que retarder ce ralentissement, et bientôt la machine s'arrêterait. Il est donc indispensable, dans de pareilles circonstances, de modifier l'action des forces qui agissent sur la machine, c'est-à-dire d'augmenter ou de diminuer, soit la puissance, soit les résistances à vaincre, afin de ramener le mouvement à un état normal. On ne peut pas, ainsi que nous l'avons vu (§ 430 et 431), faire en sorte qu'il y ait constamment un équilibre entre la puissance et les résistances; mais on doit régler les diverses forces de manière que, le mouvement s'accroissant et se ralentissant successivement, la vitesse ne s'éloigne jamais trop de celle qui convient au meilleur travail de la ma-

174 MACHINES A L'ÉTAT DE MOUVEMENT NON UNIFORME.
chine. Pour atteindre ce but, on emploie avec beaucoup d'avantage le régulateur à force centrifuge, fig. 187.

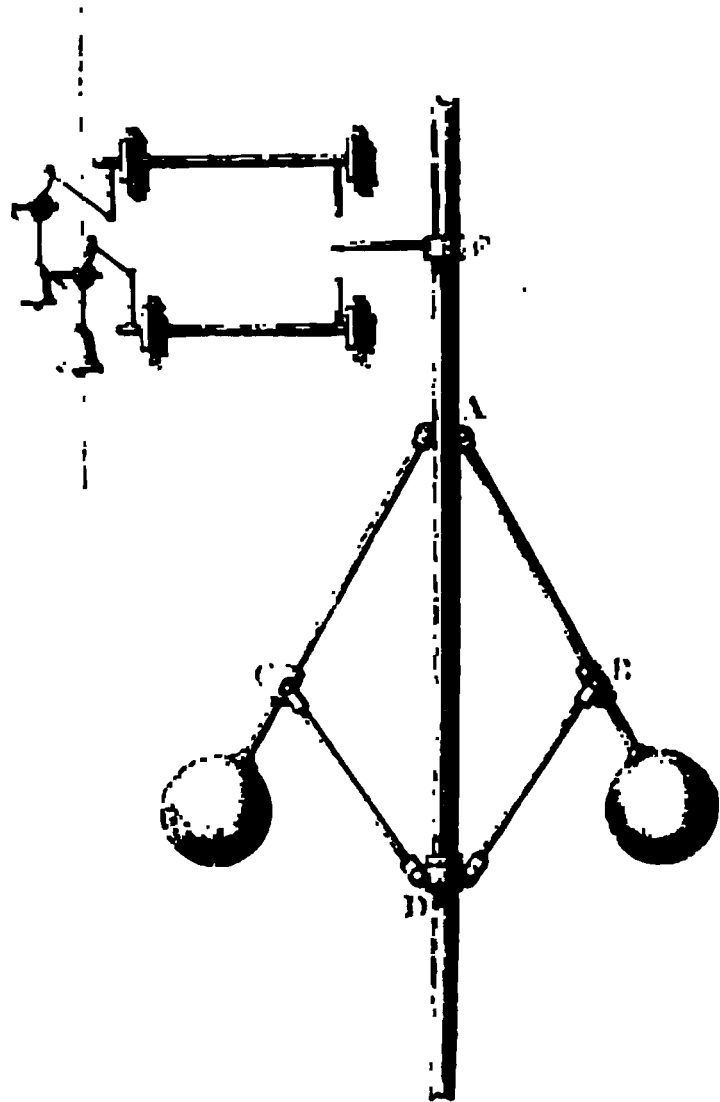


Fig. 187.

Il se compose essentiellement de deux boules niques fixées aux extrémités de deux tiges AB, AC. Ces tiges sont attachées, chacune, à un arbre vertical AD. Lorsque la machine communique un mouvement de rotation à cet arbre, les deux boules peuvent d'ailleurs tourner autour de leurs points d'attache de manière à faire des cercles plus ou moins grands, selon la vitesse de l'arbre AD. Deux autres tiges sont articulées, d'une part à B et C aux deux précitées, et d'une autre part à un anneau D qui enveloppe l'arbre vertical, et peut monter ou descendre librement le long de cet arbre. Si l'on écarte les deux boules l'une de l'autre avec les mains, le quadrilatère ABDC se déforme, sa diagonale AD se raccourcit.

En conséquence l'anneau D monte : cet anneau D s'abaisserait, au contraire, si, au lieu d'écarter les deux boules, on les rapproche de l'autre.

L'arbre vertical recevant un mouvement de rotation de la machine à laquelle le régulateur est adapté, les deux boules tournent avec le même temps. Chacune d'elles est soumise à son poids et à la force centrifuge développée par le mouvement de rotation ; elle s'écarte de l'arbre tournant, jusqu'à ce que la résultante de ces deux forces soit dirigée suivant le prolongement de la tige à laquelle elle est fixée. Si le mouvement de la machine s'accélère, les boules s'écartent plus vite ; la force centrifuge augmentera, et les boules s'écartent encore plus. Elles se rapprocheront, si le mouvement de la machine ralentit. Il en résulte que l'anneau D montera ou descendra, selon que la rapidité du mouvement de la machine sera plus ou moins grande. C'est ce mouvement ascendant ou descendant de l'anneau D qui met à profit, pour agir, soit sur la puissance, soit sur les résistances.

ION DU TRAVAIL DANS UNE MACHINE. 175

is, le régulateur agit de lui-même sur la puissance de la machine, en diminuant sa grandeur lorsque le mouvement est trop rapide, et l'augmentant lorsque la vitesse est trop petite, ce qui a lieu notamment dans les machines à vapeur que nous le verrons plus tard. Dans d'autres cas, le régulateur ne prévient l'ouvrier qui dirige la marche de la machine, indiquant si le mouvement est trop rapide ou trop lent, et peut alors modifier la grandeur de la puissance, et agir sur les résistances à vaincre, de manière à ne pas sortir des limites dont elle ne doit pas sortir. La disposition qui est employée dans les moulins à eau est destinée à produire l'effet dont nous venons de parler. L'anneau D est surmonté de deux tringles dont seule est visible sur la figure, et qui se termine par un ressort. Ce second anneau, se trouvant ainsi lié au premier, suit tous les mouvements : il s'élèvera ou s'abaissera, suivant que le mouvement de la machine sera trop rapide ou trop lent. E, qui tourne en même temps que le régulateur, est un ressort horizontal placé de manière à ne rien rencontrer, tant que la machine marche avec une vitesse convenable ; dès que la vitesse de la machine devient trop petite, ce ressort vient, à chaque tour, choquer un ressort qui fait sonner une sonnette. Les deux sonnettes, dont l'une indique que la machine va trop vite, et l'autre quand elle va trop lentement, ont des timbres différents, afin qu'on puisse distinguer dans quel sens on doit modifier la grandeur de la puissance pour faire mouvoir la machine.

mission du travail dans une machine. — Nous avons vu précédemment (§ 80), que lorsqu'une machine est soumise à un mouvement uniforme, le travail moteur et le travail résistant pendant un même intervalle de temps, sont égaux. Il ne peut plus en être de même, dans le cas où le mouvement de la machine change à chaque instant.

Si le mouvement s'accélère, il faut que la puissance l'emporte sur les résistances ; une partie seulement de la puissance leur est opposée, et l'autre partie augmente la vitesse de la machine.

Le travail produit par la première partie est égal au travail résistant, puisque, si elle existait seule, le mouvement serait uniforme. Il faut donc que le travail moteur, dû à la puissance totale, soit égal au travail résistant total de tout le travail que produit la machine. *Portion de la puissance.*

Si le mouvement se ralentit, il faut que les résistances

l'emportent sur la puissance. Celle-ci ne fait plus équilibre à la portion des résistances, et le travail moteur est égal au travail résistant dû à cette portion seulement. Le travail résistant total est donc le travail moteur de toute la quantité de travail correspondante à la portion excédante des résistances.

Ainsi le travail moteur est tantôt plus grand, tantôt plus petit que le travail résistant produit pendant le même temps, suivant que le mouvement de la machine s'accélère ou se ralentit. Mais, on admettra sans peine que l'excès de travail moteur, qui a lieu à une certaine accélération du mouvement, est précisément égal à l'excès de travail résistant qui détruit cette accélération ramenant le mouvement à ce qu'il était primitivement. On peut dire, en effet, que si une force, appliquée à une machine, et n'ayant à vaincre aucune résistance à vaincre, produisait une certaine augmentation de vitesse, il suffirait d'appliquer ensuite cette force en sens contraire pendant le même temps, ou bien d'autres forces dont l'effet lui serait équivalent, pour que la vitesse se trouvât réduite à ce qu'elle était d'abord; et il est clair que le travail moteur dans le premier cas est égal au travail résistant développé dans le second, puisque, si ces forces agissaient simultanément sur la machine, elles se feraient équilibre. On peut donc dire que, lorsque la machine se trouve, à deux instants différents, animée de la même vitesse, quels que soient les changements que sa vitesse a pu subir dans l'intervalle, il y a eu compensation exacte entre les travaux successifs du travail moteur et du travail résistant; en sorte que le travail moteur total, produit pendant tout cet intervalle de temps, est égal au travail résistant total produit pendant le même intervalle de temps. Cela aura lieu encore, si l'on prend la machine à un moment où elle commence à se mouvoir jusqu'à celui où elle revient à l'état de repos.

Habituellement, lorsqu'une machine ne peut pas, par sa construction, prendre un mouvement uniforme, comme la meule de rémouleur (§ 130), elle prend un mouvement qu'on appelle *mouvement régulier et périodiquement uniforme*; les accélérations et les ralentissements du mouvement se succèdent périodiquement, de manière que, les diverses pièces de la machine repassent par les mêmes positions, et elles y sont animées des mêmes vitesses. C'est ce qui a lieu dans la meule de rémouleur, lorsqu'il s'est déjà écoulé quelque temps depuis qu'elle a été mise en mouvement; à la fin de chaque tour qu'elle fait, elle reprend la vitesse qu'elle avait au commencement de ce tour. Dans un pareil cas, l'égalité du travail moteur et du travail résistant a lieu pendant chacune des périodes du mouvement.

Le temps qui s'écoule, depuis le moment où la machine commence à marcher, jusqu'au moment où son mouvement est devenu régulier, on trouvera que le travail moteur est plus grand que le travail résistant; l'excès du premier sur le second sert à mettre la machine dans le mouvement qu'elle possède à la fin de ce temps. Pendant tout le temps de la marche de la machine, le travail moteur sera précisément égal au travail résistant, lorsque la machine quittera son mouvement pour aller à l'état de repos, le travail résistant deviendra plus grand que le travail moteur, et il le surpassera de toute la quantité d'excès qui avait été surpassé pendant les premiers instants de la marche; en sorte que, comme nous l'avons déjà dit, le travail moteur produit pendant toute la durée du mouvement, sera égal au travail résistant correspondant.

Des volants. — Toutes les fois que le travail moteur est plus grand que le travail résistant, l'excès du premier sur le second sert à former en mouvement, et il y a accélération dans la machine; c'est pour que cette accélération ne devienne excessive qu'on emploie les volants. Mais si un volant diminue de la vitesse, il ne diminue pas pour cela l'effet de son excès sur cet accroissement. Le surcroît de mouvement, produit par la prépondérance du travail moteur sur le travail résistant, se répartit sur une plus grande masse que si le volant était plus petit, et c'est ce qui fait que la vitesse ne change pas pendant le surcroît de mouvement, qui s'accumule en grande quantité dans le volant, sans que la vitesse de la machine soit sensiblement modifiée, n'en est pas moins capable de produire la même quantité de travail résistant. On peut dire qu'un volant est un réservoir de travail; l'excès du travail moteur l'emporte sur le travail résistant, et cet excès se sur le second s'enmagasine dans le volant, sous forme de mouvement; et lorsque l'occasion s'en présente, ce travail se convertit en mouvement, et donne lieu à la production d'une quantité égale de travail résistant.

Si la machine est munie d'un volant, il faudra une plus grande quantité de travail moteur pour la mettre en mouvement, et lui faire acquérir une vitesse que si le volant n'existait pas; l'excès du travail moteur sur le travail résistant, pendant les commencements de la marche de la machine, sera plus grand qu'il n'aurait été sans cela. Mais nous ne perdons rien de l'excès de travail moteur; il est utile pendant les premiers moments de la marche de la machine, et donne lieu à la production d'une quantité égale de travail résistant.

§ 436. **Influence des résistances passives.** — Ce que nous avons dit jusqu'ici, relativement aux machines, nous avons toujours fait abstraction des frottements entre les pièces, et en général de ce que nous avons appelé les *résistances passives* (§ 423). Les résultats que nous avons obtenus ont besoin d'être complétés, sous ce rapport, pour ne rien désirer. Or, ce complément est bien simple : il suffit, en regardant les résistances passives comme faisant partie des résistances qui doivent être vaincues par la puissance, et pour lequel nous avons trouvé précédemment devient entièrement exact.

En étudiant diverses machines, sous le point de vue du travail des forces qui leur sont appliquées, nous avons vu que dans chaque cas, on pouvait trouver la grandeur de la puissance capable de faire équilibre à la résistance. Pour évaluer exactement cette puissance, on devra tenir compte, non-seulement de la résistance que la machine est destinée à vaincre, mais encore des résistances passives de toute espèce occasionnées par l'emploi de la machine : la puissance nécessaire pour que la machine se maintienne d'équilibre sera donc toujours plus grande que si ces résistances passives n'existaient pas.

En considérant les machines à l'état de mouvement, nous avons reconnu que le travail moteur était toujours égal au travail résistant. Nous sommes arrivés au même résultat dans le cas du mouvement non uniforme d'une machine, à la condition de valuer les quantités de travail pendant un intervalle de temps déterminé, commençant et finissant à la même vitesse. Cette égalité du travail moteur et du travail résistant subsistera encore, quand nous ne négligerons plus les résistances passives, pourvu qu'en évaluant le travail résistant, nous prenions celui qui correspond à ces résistances passives.

Les résistances qu'on doit considérer dans l'étude d'une machine en mouvement sont donc de deux espèces : les unes sont des résistances utiles, celles que la machine a pour objet de vaincre ; les autres sont les résistances passives. La portion du travail total, qui correspond aux premières, prend le nom de *travail utile*, et le principe de la transmission du travail s'énonce de la manière suivante : *Le travail moteur est égal au travail utile, au travail dû aux résistances passives.*

Il est en général très facile, comme nous l'avons vu dans les paragraphes 53 à 66, de trouver la grandeur de la puissance capable de faire équilibre à une résistance donnée, par l'intermédiaire d'une machine, quand on ne tient pas compte des résistances

en est plus de même lorsqu'on veut en tenir compte. Ces résistances passives sont habituellement difficiles à évaluer. Certaines ont le moins de difficultés sous ce rapport, et qui ont en même temps une plus grande influence que les autres, surtout lorsqu'une machine n'est pas animée d'une trop grande vitesse, ce sont les frottements. Les expériences nombreuses qui ont été faites permettent de déterminer les lois et la grandeur permettent de les évaluer exactement : cependant il reste toujours quelque incertitude sur leur grandeur, en raison de ce que les surfaces des corps qui sont en contact ne sont pas identiquement les mêmes que celles qu'on suppose à l'expérience, et aussi en raison de ce que les pressions occasionnées ne peuvent pas toujours être complètement uniformes. Mais les forces de frottement, dont on doit tenir compte dans une machine, sont ordinairement assez nombreuses : elles se trouvent entre les dents des engrenages, entre les tourillons des arbres tournants et les coussinets qui les supportent, etc. En outre, si l'on veut calculer la grandeur de la portion de la puissance qui fait équilibre à toutes ces forces de frottement, on est entraîné dans une grande complication. D'ailleurs, outre les frottements, il existe encore d'autres résistances passives auxquelles la machine est soumise, et qui ne peuvent, la plupart du temps, être évaluées qu'avec une grossière approximation. On voit donc qu'on ne peut pas espérer de déterminer exactement la grandeur de la puissance capable de faire équilibre à toutes ces résistances, à moins que la machine ne soit d'une grande simplicité.

Pour la même raison, il sera très difficile de calculer exactement la vitesse de travail résistant occasionnée par les diverses résistances passives, pendant un intervalle de temps quelconque, afin de voir combien le travail moteur surpasse le travail utile, pendant ce laps de temps.

On devra donc se contenter de savoir que, pour vaincre une même résistance utile, il faudra une puissance d'autant plus grande, que les résistances passives auront une plus grande influence : que pour produire une même quantité de travail utile, il faudra développer une quantité de travail moteur d'autant plus considérable, que le travail dû aux résistances passives sera plus grand. Dans la construction d'une machine, on devra toujours se proposer de diminuer autant qu'on pourra l'influence des résistances passives, afin d'employer la plus petite quantité possible de travail moteur, à la production d'une quantité donnée de travail utile. Sous le point de vue de l'économie des forces, la perfection d'une machine consistera dans la grandeur du rapport qui existera entre le travail utile et le

travail moteur, ce rapport, qui constitue ce qu'on nomme le rendement de la machine, est toujours inférieur à l'unité : mais la machine est d'autant plus parfaite, qu'il approchera davantage d'être égal à l'unité.

§ 137. *Moyens de diminuer l'influence des résistances passives.* — Pour arriver à diminuer l'influence des résistances passives, on emploie différents moyens que nous allons faire connaître, en passant en revue les diverses espèces de résistances qui ont été indiquées précédemment.

Le travail dû au frottement de deux pièces qui glissent l'une sur l'autre dépend à la fois de la grandeur de la force de frottement et de la grandeur du chemin que parcourt son point d'application, c'est-à-dire de l'étendue du glissement. Pour diminuer ce travail résistant, on pourra agir sur chacun des deux éléments dont il se compose. On diminuera d'abord la grandeur du frottement, en choisissant convenablement les matières dont on devra former les pièces destinées à glisser l'une sur l'autre ; en polissant les surfaces de ces pièces, et on les entretenant constamment lubrifiées d'huile ou de graisse. D'un autre côté, on réduira autant que possible l'étendue du glissement, en adoptant des formes convenables pour les pièces entre lesquelles ce glissement doit se produire.

C'est ainsi que les arbres, qui doivent recevoir un mouvement de rotation, sont habituellement terminés par des tourillons de fer de petit diamètre, fig. 188. Pendant que l'arbre fait un tour entier,



Fig. 188.

le point d'application de la force de frottement du tourillon sur le coussinet parcourt la circonférence du tourillon ; le chemin parcouru par ce point est d'autant moindre que le diamètre du tourillon est plus petit.

On diminue en conséquence ce diamètre, autant qu'on le peut, sans que le tourillon cesse d'être assez résistant pour ne pas se rompre sous la pression qu'il a à supporter.

C'est encore pour le même motif que l'on forme les engrenages en armant les roues de dents petites et nombreuses : car plus les dents sont grandes, plus l'étendue du glissement de ces dents les unes sur les autres est considérable. On n'est arrêté, dans la petitesse qu'on donne aux dents, que parce qu'elles doivent, comme les tourillons, conserver une solidité suffisante pour ne pas se briser.

DIMINUER L'INFLUENCE DES RÉSIST. PASSIVES. 181

ur atténuer, autant que possible, l'effet produit par la roulement, on fait disparaître les aspérités des corps rouler les uns sur les autres, et, de plus, on fait en sorte n de la puissance qui fait équilibre à la résistance au glisse à l'extrémité d'un grand bras de levier.

diminuer le travail résistant produit par la roideur des employant des cordes très flexibles. Sous ce rapport, i ont déjà servi sont bien préférables aux cordes neuves.

r soustraire, autant qu'on peut, les machines à la ré-fluides (l'air ou l'eau) au milieu desquels elles se meu-ne aux pièces qui doivent éprouver le plus directement nce une forme telle qu'elles y échappent en grande ièces sont disposées de manière à n'offrir qu'une faible rencontre du fluide; en outre, elles présentent, du côté at, des angles très aigus, de manière à fendre facilement

C'est pour ce motif, ainsi que nous l'avons déjà dit, que, pte à certaines machines des volants formés de deux terminés par des masses métalliques (§ 132), on donne la forme de lentilles aplaties qui viennent choquer l'air rche; c'est encore pour atteindre le même but, qu'on elquefois les boules du régulateur à force centrifuge les lentilles disposées également de manière à rencon-leur tranche.

itre les moyens qui viennent d'être indiqués, dans les aphes qui précèdent, et qui ont pour objet de diminuer ossible l'influence de chacune des résistances passives, rger la nature, on a encore recours à un autre moyen : il consiste à remplacer, dans certains cas, la résistance it, ou le frottement, par la résistance au roulement. is que deux pièces, destinées à glisser l'une sur l'autre, telles conditions qu'il doive se développer entre elles pressions, il y a avantage à modifier leur disposition de mplacer le glissement par un roulement : on change par le la résistance passive qui doit se développer au contact pièces, et il en résulte une diminution considérable e de travail occasionnée par cette résistance.

ons donner comme exemple les roulettes qu'on dis-pieds des meubles, et qui permettent de les déplacer ent sans les soulever. Si ces roulettes n'existaient pas, soin d'appliquer au meuble une force beaucoup plus r le faire glisser. Lorsque le mouvement doit s'effec-dans une même direction, comme pour les lits, les

axes des roulettes sont fixés aux pieds, perpendiculairement à la direction du mouvement, *fig. 489*. Mais lorsque le mouvement doit



Fig. 489.



Fig. 490.

pouvoir se faire dans toutes les directions, comme pour les tables ou les fauteuils, l'axe *A* de la roulette, *fig. 490*, est fixé à une chape *B*, qui peut elle-même tourner autour d'un axe vertical *CD*. Lorsqu'on cherche à déplacer le pied qui porte une pareille roulette, la chape commence par tourner autour de *CD*, de manière à porter la roulette dans le sens opposé à celui dans lequel doit s'effectuer le mouvement; puis la roulette tourne autour de son axe *A*, en roulant sur le parquet.

Les roulettes qu'on emploie dans les machines pour substituer le roulement au glissement, sont ordinairement appelées *galets*. Nous en avons vu un exemple dans la grue qui est figurée à la page 64. L'axe vertical *PP* de la grue présente une partie cylindrique *R*, à l'endroit où il sort du massif de maçonnerie. Cette partie, qui doit tourner dans une ouverture circulaire de même diamètre, exerce une très grande pression contre les bords de cette ouverture : il est donc très important que, dans le mouvement qu'on donnera à la grue autour

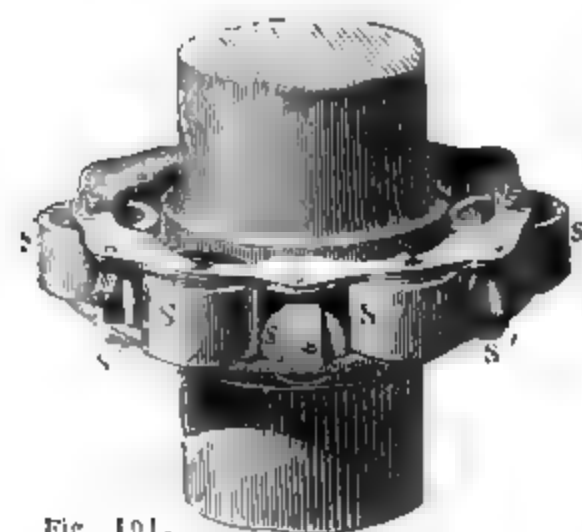


Fig. 491.

de son axe vertical, il se produise un roulement au lieu d'un glissement, afin qu'on n'éprouve pas une trop grande difficulté à la faire tourner. C'est pour cela qu'on a disposé, tout autour de la partie cylindrique *R*, des galets *S, S*, montés sur une même chape mobile, comme le montre la *fig. 491*. Lorsque la grue tourne, chaque galet roule entre la surface cylindrique *R*, et une autre surface cylindrique

concave, qui est scellée dans la maçonnerie. Les axes des galets ne restent pas immobiles, ils entraînent la chape qui les réunit, et lui communiquent un mouvement de rotation qui est plus lent que celui

À DIMINUER L'INFLUENCE DES RÉSIST. PASSIVES. 183

L'ensemble des galets et de leur chape forme une es-
seau qui a besoin d'être soutenu inférieurement, puisqu'il
à rien : il repose pour cela sur une surface plane et an-
ai fait partie du massif, et, pour éviter le frottement de la
rieure de la chape sur cette surface, on lui a adapté d'au-
ets S' , S' , à axes horizontaux, par lesquels s'appuie tout
il qui nous occupe en ce moment.

La machine d'Atwood, décrite précédemment (page 95), la
qui est à la partie supérieure a besoin d'être extrêmement
: pour que les expériences faites avec cette machine présen-
un certain degré d'exactitude, il faut que les effets soient
és le moins possible par les résistances passives. Pour y
nir, on a imaginé un mode particulier de suspension de la
e, que nous allons décrire. La poulie A, fig. 192, est traversée
en centre par un axe cylindri-
de petit diamètre, qui fait
ps avec elle. Si cet axe avait
posé dans deux coussinets, il
ait éprouvé un frottement, pen-
at que la poulie aurait tourné :
is, au lieu de cela, on a placé
eune de ses deux extrémités
is l'angle formé par les circon-
nces de deux roues B, B, qui
t placées à côté l'une de l'au-
, de manière à se recouvrir en
tie. Lorsque la poulie tourne,
axe roule sur les quatre roues
B, sans changer pour cela de
ition ; le glissement qui aurait
lieu, si l'axe avait reposé sur
x coussinets, se trouve ainsi

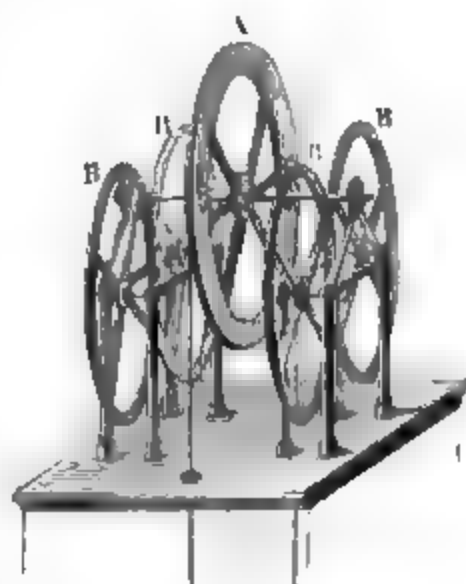


Fig. 192.

placé par un roulement, et la résistance que la poulie éprouve
beaucoup moindre. Il se produit cependant encore des frotte-
nts entre les axes des roues B, B, et leurs supports, mais ces
tements n'ont qu'une influence insensible sur le mouvement de
oulie, en raison du faible chemin que parcourent leurs points
plication, pendant que la poulie fait un tour entier. § 72. L'axe
a poulie A, s'appuyant, comme nous venons de le dire, sur les
tre roues B, B, pourrait encore glisser sur ces roues dans le
s de sa longueur, et déplacer ainsi la poulie, ce qui nuirait aux
iences : pour empêcher ce mouvement, on a terminé l'axe A

deux pointes fines, à ses deux extrémités, fig. 193, et l'on a deux petits plans d'acier, contre lesquels ces deux pointes viennent butter, ce qui maintient l'axe dans une position invariable.

Enfin nous donnerons, comme dernier exemple de la substitution du roulement au glissement, le mode de suspension de la



Fig. 193.

cloche de Metz, qui fonctionne depuis quatre cents ans. Le mouton de cette porte deux tourillons cylindriques, autour desquels la cloche doit tourner, lorsqu'on la fait sonner. Si ces tourillons reposaient dans des sinets ordinaires, ils éprouveraient des frottements qui tendraient à diminuer le mouvement de la cloche ; en sorte qu'il faudrait employer une plus grande force pour en augmenter l'amplitude de ses oscillations. Mais, au lieu de cela, on a appuyé chaque tourillon sur un

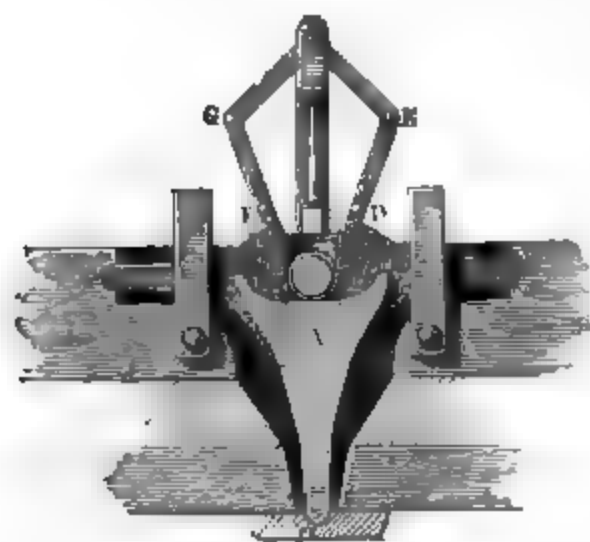


Fig. 194.

secteur A, fig. 194, mobile autour de son point d'appui inférieur et terminé supérieurement par un arc de cercle dont le centre est ce point d'appui. Lorsque la cloche est en mouvement, le tourillon repose sur ce secteur, qui en même temps que son point d'appui inférieur s'incline, tantôt à droite, tantôt à gauche, suivant que la cloche elle-même se penche à droite ou à gauche. Pour maintenir le tourillon toujours en contact avec le point d'appui du secteur A, on a disposé de part et d'autre, des leviers B, C, destinés à l'empêcher de se déplacer latéralement. Si ces leviers étaient fixes, il en résulterait encore, à certains moments, un frottement sur le tourillon ; aussi a-t-on donné à ces leviers la forme de secteurs, et les a-t-on rendues mobiles autour des points b, c, de manière à remplacer encore le glissement du tourillon sur leur surface par un roulement. Le tourillon étant toujours appuyé sur le secteur A, il en résulte une adhérence qui

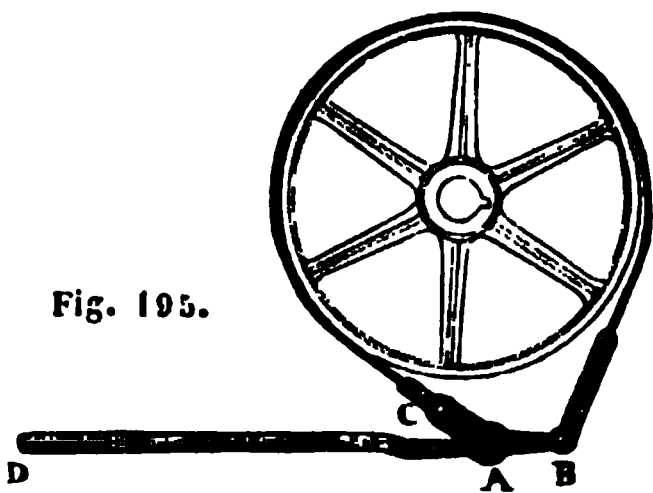
ÉTAT L'INFLUENCE DES RÉSIST. PASSIVES 185

tourne nécessairement en même temps que le tourillon que la cloche est au repos, le tourillon repose toujours de l'arc de cercle qui termine ce secteur. Mais il en est de même pour les deux autres secteurs B, C; le tourillon se déplace alternativement sur l'un et sur l'autre, et l'on ne doit pas craindre l'adhérence de leurs surfaces avec le tourillon, en le maintenant constamment dans une position convenable : les secteurs sont-ils soutenus par les tiges DE, FG, articulées, D et F avec les secteurs, et d'une autre part, en E et G avec la partie supérieure du mouton. Pendant le mouvement de haut du mouton s'incline, tantôt d'un côté, tantôt de l'autre, les secteurs B, C, se meuvent en même temps, en baissant alternativement; les choses ont été disposées de telle sorte, que les mouvements de ces secteurs soient les mêmes qu'ils auraient été produits par le roulement du tourillon sur ces arcs.

RECHERCHES D'AUGMENTER L'INFLUENCE DES RÉSISTANCES

Habituellement, on doit toujours chercher à atténuer l'action des résistances passives, afin de produire le plus grand effet utile, avec une quantité donnée de force motrice; mais il y a des circonstances exceptionnelles où, au contraire, on a besoin, pour accélérer la marche de la machine, soit même pour l'arrêter, de créer des frottements qui n'existent pas dans la marche régulière de la machine; les pièces qui sont destinées à produire ces frottements sont désignées en général sous le nom de freins. Nous nous contenterons, pour le moment, de donner un exemple du frein qu'on adapte ordinairement aux machines à vapeur, dans le cas où il faut arrêter le mouvement. Ce frein se compose d'une lame de fer qui enveloppe à son extrémité un tambour fixé latéralement à l'arbre des roues dentées. Ce frein est représenté sur la fig. 81, page 64; il est à gauche de la cloche. Les deux bouts de la lame sont attachés aux extrémités B, C, des deux petits bras

Fig. 195.



représenté sur la fig. 81, page 64; il est à gauche de la cloche. Les deux bouts de la lame sont attachés aux extrémités B, C, des deux petits bras

d'une espèce de levier à trois bras BCD, qui peut tourner autour du point fixe A. Lorsqu'on vient à soulever le grand bras du levier, la lame de tôle se trouve serrée contre la surface du tambour à son intérieur, et, si ce tambour tourne, il éprouve un frottement d'autant plus considérable, qu'on agit plus fortement pour soulever l'extrémité D du levier. Lorsqu'on ne veut pas produire ce frottement, on laisse retomber le grand bras du levier, la lame n'est plus serrée contre le tambour, et, si elle le touche encore en quelques points, il n'en résulte qu'un faible frottement. Pendant tout le temps qu'on fait tourner les manivelles de la grue, pour soulever un fardeau, le frein ne fonctionne pas : mais lorsque ce fardeau, après avoir été élevé, se trouve amené, par la rotation de la grue, au-dessus de l'endroit où l'on veut le déposer, on abandonne les manivelles : le fardeau descend en vertu de son poids, en faisant tourner les roues en sens contraire, et on ne laisse pas croître sa vitesse au-delà d'une certaine limite, en agissant sur le frein, de manière à faire équilibre au poids du fardeau par le frottement qui se développe.

Nous trouverons, plus tard, l'occasion d'indiquer d'autres machines qui sont destinées à produire des effets analogues à celui dont nous venons de parler.

Lorsqu'il existe dans une machine une pièce qui roule sur une autre, on en profite quelquefois pour augmenter au besoin les résistances passives. Pour cela, on empêche cette pièce de rouler : elle peut donc continuer à se mouvoir qu'en glissant, et la résistance qui provenait du roulement est remplacée par un frottement.

§ 141. Pour pouvoir indiquer un moyen de produire rapidement une très grande résistance, nous allons étudier le frottement

qui se développe entre un cylindre fixe et une corde qui glisse sur sa surface.

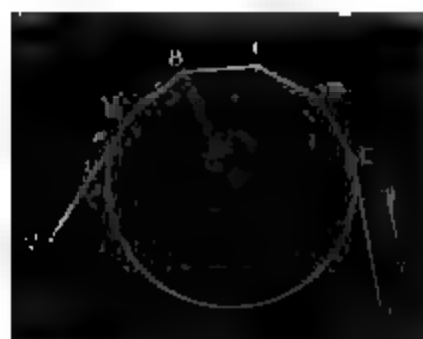


Fig. 196.

Sont AE, fig. 196, la portion du contour d'un cylindre sur lequel glisse une corde, dans le sens de la flèche : la corde est soumise à la partie A à la force P, qui tire dans le sens du mouvement, et à une autre partie E à la force Q, qui résiste et agit en sens contraire. Le mouvement est uniforme, la force P est égale à la force Q augmentée de tout le

frottement qui se développe le long de l'arc AE. Pour concevoir plus facilement ce frottement est produit, imaginons que l'arc AE est

sieurs parties AB, BC, ..., assez petites pour pouvoir être lées comme de petites lignes droites; l'arc AE sera assis par la, à une portion de polygone sur laquelle la corde glisse. À un sommet quelconque B, aboutissent deux cordons BC, ont les tensions différent l'une de l'autre de la grandeur du ment produit sur ce point même: ces deux tensions, tres ifférentes, ont une résultante dirigée suivant BB', qui est la on exercée par la corde sur le sommet B, et c'est cette pres- qui détermine le frottement en B. On voit par là que la tension corde va en augmentant constamment, depuis le point A ou elle rale à Q, jusqu'au point E où elle est égale à P: et que, de elle n'augmente pas uniformément, puisque le frottement, en ce point, est d'autant plus grand que la tension y est elle- e plus considérable.

ur trouver la loi suivant laquelle varie la tension de la corde,

la portion de sa longueur qui s'applique sur le contour du dre, imaginons que, l'arc de contact étant toujours AE, fig. 196, sistance Q devienne double de ce qu'elle était: en doublant la P, elle fera encore équilibre à la force Q et aux frottements se développent. Car les tensions se trouveront toutes doublées, pressions que ces tensions déterminent en B, C, seront doubles e qu'elles étaient; les frottements, qui sont proportionnels aux sions, seront donc également doubles de ce qu'ils étaient: en e que la force P, après avoir été doublée, sera bien encore égale force Q augmentée des forces de ement, forces qui sont toutes deux plus grandes que précédemment on rendait la force Q triple, qua- de, de ce qu'elle était d'abord uirait que la force P eût une va- triple, quadruple, ... de sa valeur itive, pour qu'il pût toujours y e équilibre entre ces deux forces s frottements développés.

nt AD, fig. 197, l'arc total em- se par une corde qui glisse sur cylindre: divisons cet arc en i parties égales AB, BC, CD. La ion AB de la corde se trouve emment dans les mêmes condi-

quo si la corde, commençant à s'enrouler en A, se détachait suivant BB', et étant soumise en B' à une force de traction



Fig. 197.

égale à la tension qui existe au point B. De même la portion BC se comporte comme si la corde, commençant à s'enrouler en C, se détachait en C, et était soumise en B'', et C', à des forces respectivement égales aux tensions qui existent en B et C. Enfin, nous également regarder la portion CD comme appartenant à une corde qui commencerait à s'enrouler en C, se détacherait en C, et serait soumise, à une de ses extrémités C', à la tension qui existe au point C, et à l'autre extrémité à la force P. Admettons, pour simplifier les idées, que le frottement qui se développe le long de la corde soit précisément égal à la force Q : la force appliquée au point C, c'est-à-dire la tension au point B, pour faire équilibre à cette force et à la résistance Q, devra être double de cette résistance. La force appliquée en B'', à la corde B''BC', sera donc double de la force appliquée en B' : l'arc BC est exactement le même que l'arc AB : il en résulte que ce que nous avons vu, il n'y a qu'un instant, que la force en C' devra être double de celle qui est appliquée en B', et que cette force, ou bien la tension en C, sera égale à quatre fois la force Q. Enfin, par la même raison, la force appliquée en D, devra être quadruple de la force Q, la force P ne pourra lui faire équilibre qu'autant qu'elle sera égale à huit fois la force Q. En continuant à nous prendre, sur la portion enroulée de la corde, des points tels que leurs distances au point A croissent en progression arithmétique, les tensions de la corde en ces différents points croissent comme les termes d'une progression géométrique. On peut



Fig. 128.

encore que, si la corde, soumise à la même résistance Q, embrasse le cylindre successivement le long d'un arc croissant comme les termes d'une progression arithmétique, la force appliquée en P, pour faire équilibre à la résistance, aura des valeurs croissantes comme les termes d'une progression géométrique. Supposons, par exemple, que la corde embrasse le cylindre suivant un certain arc (fig. 128), la force P doit, pour faire équilibre à la résistance Q, être à 3 fois cette résistance; elle sera à 9 fois la même résistance, dans le cas où la corde toucherait le cylindre le long d'un arc double AC; elle devrait être égale à 27 fois la résistance si la corde touchait le cylindre le long d'un arc triple, et ainsi

D'AUGMENTER L'INFLUENCE DES RÉSIST. PASSIVES. 189

On profite souvent de la grandeur du frottement devant le glissement d'une corde sur un cylindre fixe, pour une résistance convenable à un mouvement qu'on veut, ou même arrêter complètement. C'est ainsi que, pour un bateau qui se meut sur une rivière, on saisit une corde dont une extrémité est attachée au bateau, et on lui fait faire deux tours autour d'une pièce de bois cylindrique fixée verticalement dans le sol, *fig. 199* ; il suffit ensuite de tirer l'extrémité libre

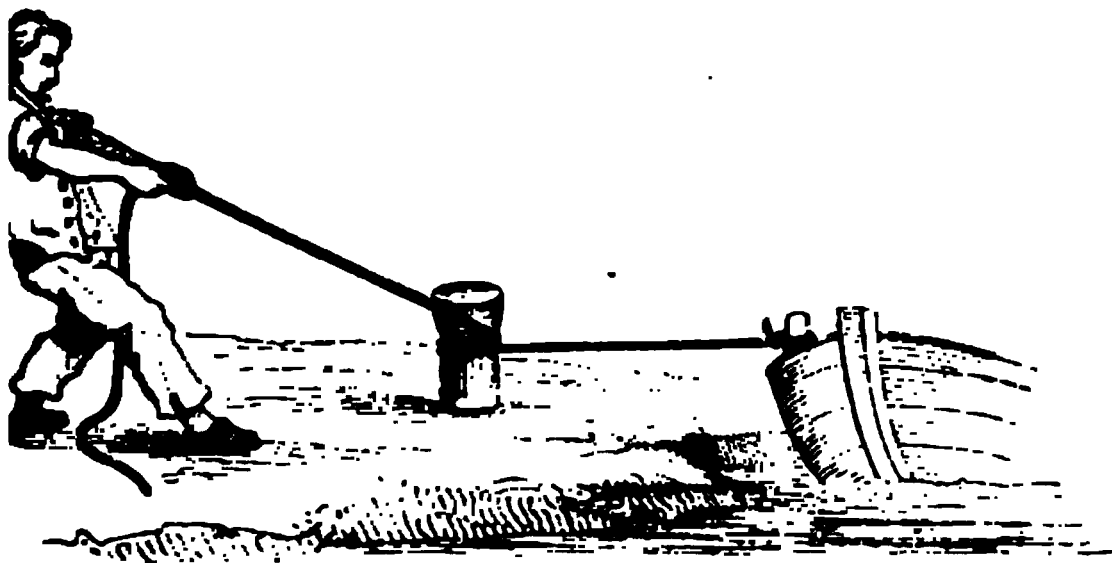


Fig. 199.

corde, pour que le bateau, éprouvant une grande difficulté à glisser sur le cylindre, ralentisse son mouvement de plus en plus et finisse par s'arrêter tout à fait. D'après ce que nous avons vu dans le paragraphe qui précède, si la corde ne faisait qu'un tour du cylindre, et qu'il fallût, pour la faire glisser, lui opposer, du côté du bateau, une force de traction 5 fois plus grande que la résistance exercée par l'homme qui la retient, la force de traction devrait être 25 fois plus grande que la résistance, dans le cas où la corde ferait deux tours au lieu d'un ; elle devrait être 125 fois plus grande que la résistance, si elle faisait trois tours ; et ainsi de suite. Mais si le bateau exerce une force de traction sur la corde, réciproquement la corde agit sur lui, en lui faisant éprouver une résistance égale à la force de traction : on conçoit donc que, par le moyen qui vient d'être indiqué, une faible résistance appliquée à la corde puisse produire un effet équivalent à une résistance extrêmement grande appliquée au bateau.

Quand nous avons décrit le cabestan, nous avons dit (page 51), au lieu d'attacher le câble sur la surface du cylindre, on lui fait deux ou trois fois le tour de cette surface, puis qu'on applique à l'extrémité libre une force de traction suffisante pour empê-

cher le câble de glisser. On conçoit maintenant comment une force, appliquée de cette manière, peut suffire pour empêcher le glissement, même lorsque la résistance que doit vaincre le câble est très considérable.

§ 443. **Perte de travail occasionnée par les chocs.** D'après ce que nous avons vu, lorsque, à un moment quelconque du mouvement d'une machine, le travail moteur qui se développe est plus grand que le travail résistant correspondant, l'excès du travail moteur se transforme en mouvement. Le surcroît de mouvement que la machine reçoit ainsi produit ensuite, lorsque le mouvement se ralentit, une quantité de travail résistant précisément égale au travail moteur qui l'avait occasionné. En sorte que, ainsi que nous l'avons observé, l'excédant du travail moteur produit pendant un certain temps, sur le travail résistant correspondant, s'emmagasine dans la machine sous forme de mouvement, et se trouve plus tard complètement utilisé, lorsque l'occasion s'en présente. Il est donc indispensable de conserver le mouvement de la machine autant qu'on le peut, et d'empêcher qu'il ne se détruise, sans produire l'effet qu'il est capable de produire. C'est pour ce motif qu'on doit toujours éviter avec soin qu'il y ait des chocs entre les diverses pièces qui sont en mouvement. Pour faire bien comprendre ce qu'il y a de nuisible dans un choc, nous allons entrer dans quelques détails.

Imaginons qu'une balle de plomb A, animée d'une certaine vitesse vienne choquer une autre balle de plomb B, de même masse et au repos. D'après ce que nous avons vu (§ 447), ces deux balles se mouvront, après le choc, avec une vitesse commune, égale à la moitié de la vitesse qu'avait la balle A avant le choc. Voyons maintenant quelles sont les quantités de travail moteur capables de produire le mouvement qui avait lieu avant le choc, et le mouvement qui succède au choc. La balle A, pour acquérir la vitesse qu'elle avait d'abord, aurait dû tomber d'une certaine hauteur; en multipliant cette hauteur par le poids de la balle, on aura la mesure du travail moteur qui se serait transformé dans le mouvement qu'elle possédait immédiatement avant le choc. Les deux balles se mouvant ensemble, après le choc, avec une vitesse moitié de celle qu'avait la balle A, auraient dû tomber, pour acquérir cette vitesse, d'une hauteur quatre fois plus petite que la précédente (§ 87); le travail moteur capable de produire leur mouvement n'est donc que la moitié de celui que nous venons de trouver: puisque, pour l'obtenir, il faut multiplier une masse deux fois plus grande par une hauteur quatre fois plus petite. Ainsi le mouvement que posséderait

ux balles, après le choc, ne sera capable de produire que la moitié du travail résistant qui aurait pu être produit par le mouvement de la balle A avant le choc. La modification brusque que le choc apporte dans le mouvement des deux balles, a donc fait perdre la moitié de l'effet que ce mouvement pouvait produire.

Nous venons de prendre pour exemple le choc de deux corps entièrement dépourvus d'élasticité, et c'est pour cela que nous avons vu que le choc occasionnait une perte de travail; le résultat n'aurait été tout différent, si au lieu de deux balles de plomb, nous eussions considéré deux billes d'ivoire. Nous savons en effet que, si la balle A, animée d'une certaine vitesse, vient choquer la balle B au repos, la balle A s'arrête complètement, et son mouvement passe dans la balle B (§ 118); le mouvement qui a lieu après le choc est donc capable de produire exactement la même quantité de travail résistant que celui qui avait lieu avant le choc: en sorte que, dans ce cas, le choc n'entraîne pas une perte de travail.

Il est aisé de voir à quoi tient la différence de ces effets. Dans le choc de deux balles de plomb, il se produit une déformation qui persiste après le choc; les forces moléculaires s'opposent à cette déformation, qui donne lieu, en conséquence, au développement d'une certaine quantité de travail résistant: c'est précisément ce travail résistant, occasionné par le choc, qui détermine la perte de travail que nous avons constatée. Dans le cas des deux billes d'ivoire, il se produit d'abord une déformation: mais, en vertu de leur élasticité, les deux billes reviennent à leur forme primitive. L'éloignement des molécules de leurs positions d'équilibre donne lieu à un travail résistant; mais ces molécules, en reprenant les places qu'elles occupaient d'abord à l'intérieur des deux billes, développent un travail moteur précisément égal au travail résistant dont on vient de parler. La première partie du choc, celle pendant laquelle la déformation des corps augmente, est accompagnée d'une perte de travail, de même que si ces corps étaient dépourvus d'élasticité; mais la seconde partie, celle pendant laquelle la déformation disparaît, est accompagnée d'un gain de travail qui compense exactement la perte précédente, et il en résulte que le choc tout entier n'a donné lieu à aucune perte de travail.

Ce que nous avons trouvé, dans les deux exemples simples que nous venons de prendre, a lieu encore dans tous les autres cas. Le choc entre deux corps dépourvus d'élasticité détermine toujours une perte de travail, quelles que soient les formes et les masses de ces deux corps, et aussi quelles que soient les circonstances dans les-

quelles ce choc se produit. De même le choc entre deux corps parfaitement élastiques n'occasionne aucune perte de travail.

Les pièces qui se choquent dans les machines ne rentrent, en général, ni dans l'une, ni dans l'autre de ces deux classes extrêmes dont nous venons de parler ; elles ne sont, ni dépourvues d'élasticité, ni parfaitement élastiques. Mais, sous le rapport de la perte de travail, les choses se passent à très peu près comme si les pièces étaient entièrement dépourvues d'élasticité. En effet, si deux corps qui se sont choqués se séparent avant que la déformation produite par le choc ait disparu, et c'est ce qui a lieu habituellement, peu importe qu'elle disparaisse ensuite, ou qu'elle persiste : le travail moteur que produiront les molécules, en revenant à leurs positions d'équilibre, ne fera que déterminer des vibrations, qui se transmettront de proche en proche dans les diverses pièces de la machine, et finiront par se perdre complètement ; ce travail moteur ne pourra, en aucune manière, compenser la perte de travail occasionnée par la déformation que les corps ont éprouvée. Les chocs dans les machines, sont donc toujours accompagnés d'une perte de travail ; aussi doit-on les éviter avec le plus grand soin : et, si l'on ne peut empêcher certains chocs de se produire, doit-on le faire en sorte que les corps qui se choquent présentent un grand degré d'élasticité. Un autre puissant motif doit engager encore à empêcher la production des chocs, entre des pièces qui ne sont pas parfaitement élastiques : c'est que les vibrations que ces chocs déterminent causent des ébranlements qui détériorent promptement les machines, et nécessitent de fréquentes réparations.

§ 144. **Conséquences générales de ce qui précède.** — résumant tout ce qui vient d'être dit sur les machines, considérées à l'état de mouvement non uniforme, nous pouvons dire que :

1° Il n'est pas nécessaire que la puissance fasse toujours équilibre aux résistances ; si, à certains moments, il y a un excès de puissance, il en résulte une augmentation de mouvement, qui ne produit plus tard le même effet que cet excès de puissance lui-même.

2° Si la puissance et les résistances ne se font pas constamment équilibre, et qu'en conséquence la machine doive emmagasiner, à certains moments, sous forme de mouvement, l'excès du travail du moteur sur le travail résistant, on lui adapte un volant qui est destiné à empêcher que la vitesse ne varie d'une manière trop déraisonnable, par l'accumulation du mouvement qu'occasionne cet excès de travail moteur.

3° Si, par l'accumulation successive du mouvement de

APPLICATION A L'ÉTUDE DE QUELQUES MACHINES. 193

ès du travail moteur, la vitesse de la machine peut devenir grande, l'emploi d'un régulateur à force centrifuge permet de régler la puissance, pour en régler la grandeur, de manière à maintenir la vitesse de la machine entre des limites convenables. Les résistances passives qui se développent dans le mouvement d'une machine, absorbant inutilement une portion de la puissance, il est nécessaire de disposer la machine de manière à diminuer l'influence autant qu'on le peut.

Enfin, les chocs entre deux corps qui ne sont pas parfaitement élastiques, occasionnant toujours des pertes de travail, on doit les éviter par tous les moyens possibles ; et, si l'on ne peut pas y arriver, on doit faire en sorte que les pièces qui se choquent soient robustes.

Après maintenant que nous sommes arrivés à la connaissance des principes nécessaires pour l'étude des machines, nous allons passer à l'application à un certain nombre d'exemples, choisis parmi ceux qui peuvent présenter le plus d'intérêt.

APPLICATION DES PRINCIPES PRÉCÉDENTS A L'ÉTUDE DE QUELQUES MACHINES.

5. Descente, transport et érection de l'obélisque de Louxor. — L'obélisque qu'on voit à Paris, au centre de la place de la Concorde, a été amené, il y a peu d'années, de la haute Egypte, où il servait d'ornement à l'entrée principale du palais de Luxor. Nous allons voir par quels moyens on est parvenu à déplacer cette pierre énorme, et à l'installer dans la position qu'elle occupe maintenant : nous donnerons des meilleurs exemples qu'on puisse donner de l'emploi des machines pour vaincre des résistances considérables.

L'obélisque est de granite, et a la forme d'un tronc de pyramide très allongée, surmonté sur sa petite base d'un pyramidion équilatéral. Le côté de la base inférieure a 2^m,42 ; celui de la base supérieure a 1^m,54 : la distance de ces deux bases, comptée suivant l'axe, est de 21^m,60 ; enfin le pyramidion a une hauteur de 1^m,20. D'après ces dimensions, on trouve que le volume de l'obélisque est de 230 000 mètres cubes. D'ailleurs le mètre cube de granite pèse 2750^k ; le poids de l'obélisque est donc d'environ 230 000 kilogrammes. Si l'obélisque était aussi large en haut qu'en bas, son centre de gravité serait sur son axe, et au milieu de sa longueur ; mais, en raison de sa plus grande largeur de la partie inférieure, ce point se trouve plus bas, à environ 9 mètres de la base. Nous savons que

la considération du centre de gravité est indispensable, toutes les fois qu'il s'agit de faire mouvoir des corps pesants.

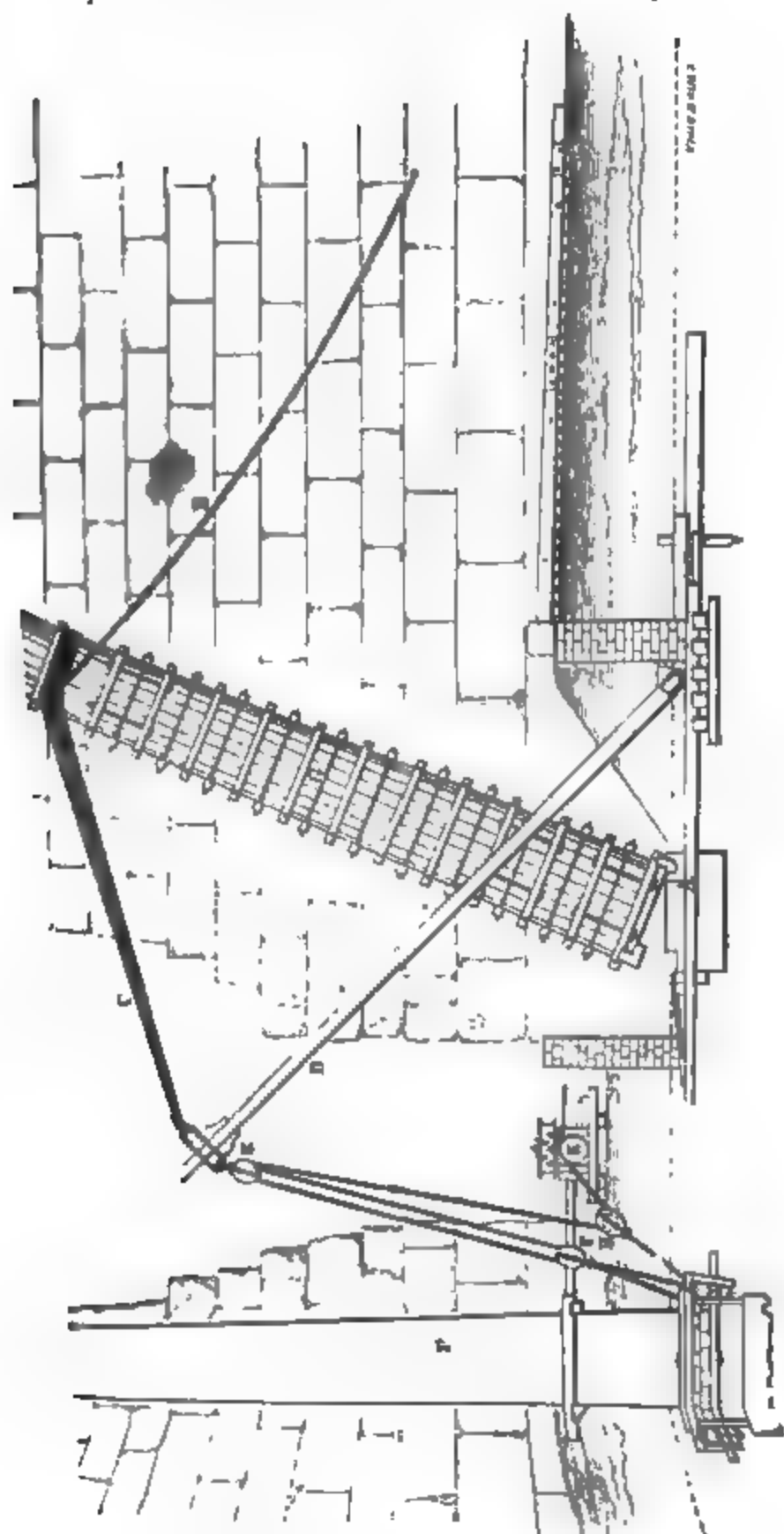
Pour amener l'obélisque de la haute Egypte à Paris, on avait construit un navire qui pût le transporter, depuis le point du Nil le plus rapproché du palais de Luxor, jusque dans l'intérieur de Paris. Ce navire, nommé *le Luxor*, devait donc descendre le Nil dans une longueur de 800 kilomètres, venir de l'embouchure de ce fleuve au Havre, à travers la Méditerranée et l'océan Atlantique, et ensuite remonter la Seine, du Havre à Paris, dans une longueur de 400 kilomètres. Ce transport par eau a présenté de très grandes difficultés, tant sur mer que sur les deux fleuves, en raison de la forme spéciale qu'on avait dû donner au navire, pour qu'il pût marcher dans des circonstances si diverses, avec un chargement considérable. Mais nous n'avons pas à nous en occuper ici : nous n'examinerons que les moyens dont on s'est servi pour descendre l'obélisque de sa base, en Egypte, et l'introduire dans l'intérieur du navire ; puis ceux qui ont été employés, à Paris, pour le transporter du navire sur la place de la Concorde, et pour l'ériger sur son piédestal, au milieu de cette place.

§ 146. On profita d'abord de la crue du Nil, pour amener le navire dans un lieu qu'on jugea convenable à l'embarquement, et où il devait se trouver à sec, lorsque les eaux du Nil se seraient retirées. Puis on construisit un chemin, allant en pente douce, depuis ce lieu jusqu'à l'obélisque. Pour donner à ce chemin une plus grande inclinaison, et faciliter ainsi le transport de l'obélisque au navire, on le fit aboutir, non pas à la base de l'obélisque, mais à 5 mètres au-dessus de cette base. Les opérations à effectuer pour embarquer l'obélisque consistaient donc à le renverser, pour le coucher sur le haut de cette espèce de plan incliné ; puis à le faire mouvoir le long de ce plan, jusqu'à ce qu'il fût introduit dans le navire, qui était placé sur le prolongement du chemin, et dont on avait enlevé la partie antérieure.

La première partie de ces opérations était celle qui présentait les plus grandes difficultés : il fallait renverser le monolithe, en le soutenant de manière à l'amener lentement, et sans secousses, dans une position à peu près horizontale. Si les machines employées pour cela n'avaient pas présenté une solidité suffisante, elles auraient cédé sous le poids de l'obélisque, et il se serait infailliblement brisé en tombant.

Après avoir recouvert ses quatre faces d'une enveloppe de bois destinée à garantir les inscriptions dont elles sont couvertes, on dégagea complètement l'arête de sa base qui se trouvait du côté de

ENTRÉE, TRANSPORT ET ÉRECTION DE L'OBÉLISQUE. 11



plan incliné, puis on adapta, tout du long de cette arête, une forte pièce de bois, entaillée de manière à l'embolter complètement. Cette pièce de bois A, *fig. 200*, était arrondie extérieurement, et se trouvait placée dans une sorte de large cannelure, pratiquée dans une autre pièce de bois de grande dimension, qui devait rester fixe tandis que la première pièce devait suivre l'obélisque dans son mouvement. C'est autour de cette espèce de charnière que l'on devait faire tourner l'obélisque, pour l'abaisser sur le haut du plan incliné.

Pour produire ce mouvement, on attachait des câbles B à la tête de l'obélisque : puis, en les tirant fortement, à l'aide de cabestans, on amena la tête du côté du plan incliné. L'ensemble des forces nécessaires pour déterminer ce premier déplacement n'était qu'une petite fraction du poids total de l'obélisque, parce que leurs directions étaient beaucoup plus éloignées de l'axe de rotation A, que la verticale passant par le centre de gravité du monolithe. D'ailleurs ces

forces n'avaient besoin d'agir que jusqu'à ce que le centre de gravité G vint se placer verticalement au-dessus de l'axe A, comme le montre la *fig. 201* : car, aussitôt que le corps aurait dépassé cette position, il devait continuer de lui-même à tourner autour de l'axe A, en vertu de l'action de la pesanteur. C'est alors que l'obélisque devait être retenu assez fortement, pour que son poids ne lui communiquât qu'un mouvement très lent et régulier.

Il eût été extrêmement difficile de retenir l'obélisque, à l'aide de câbles disposés comme les câbles B dont nous venons de parler, mais placés de l'autre côté : de pareils câbles de retenue auraient dû exercer une résistance énorme vers la fin de l'opération. On voit en effet que, à mesure que le mouvement de rotation s'effectue, la verticale menée par le centre de gravité s'éloigne de plus en plus de l'axe A, tandis qu'au contraire, la direction de ces câbles de retenue se serait rapprochée de plus en plus de cet axe ; en sorte que, d'une part, le bras de levier sur lequel agit

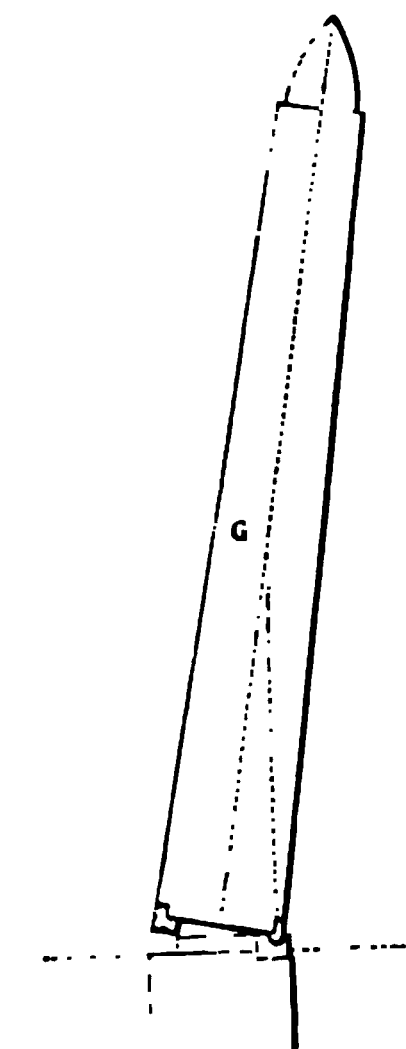


Fig. 201.

le poids de l'obélisque augmente constamment, et d'une autre part le bras de levier de l'ensemble des résistances chargées de mo-

DESCENTE, TRANSPORT ET ÉRECTION DE L'OBÉLISQUE. 197

Par le mouvement, aurait été toujours en diminuant, jusqu'à devenir très petit. Aussi a-t-on adopté une autre disposition, qui a permis de descendre l'obélisque sans avoir à exercer une si grande résistance.

La résistance nécessaire pour modérer la descente a été appliquée par l'intermédiaire d'un cadre D, mobile autour de son côté inférieur. Ce cadre était formé de huit mâts disposés dans un même plan, quatre d'un côté de l'obélisque, et quatre de l'autre côté, ainsi que le fait voir la fig. 202; les extrémités inférieures étaient implantées dans

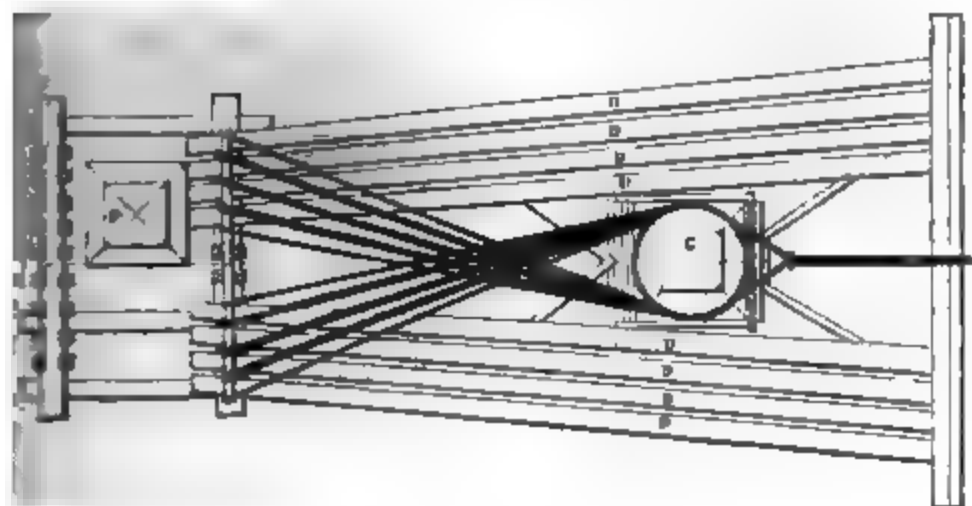


Fig. 202.

une pièce solidement appuyée dans un angle; et leurs extrémités supérieures, rapprochées les unes des autres, étaient réunies par deux moises, de manière à former un tout capable d'une grande résistance. Des câbles C étaient attachés d'une part à l'obélisque, et d'une autre part à l'extrémité supérieure du cadre D; c'est ensuite à ce cadre que la résistance a été appliquée, à l'aide des systèmes de moules E, F. Si l'on examine les différentes positions qu'a dû prendre l'obélisque, pendant l'opération de la descente, et les positions qu'a prises en même temps le cadre D, tournant autour de son côté inférieur, on verra que les câbles C se sont toujours trouvés à une grande distance de l'axe de rotation A de l'obélisque, et que les câbles des moules E, F, ont également toujours été convenablement éloignés de l'axe de rotation du cadre D. Ces câbles, agissant à l'extrémité de bras de levier qui ne devaient pas devenir trop petits, n'ont pas eu besoin de présenter une résistance aussi excessive que si les systèmes de moules E, F, avaient été directement appliqués à la tête de l'obélisque.

Les systèmes de moules E, F, étaient au nombre de huit; chacun

198 APPLICATION A L'ÉTUDE DE QUELQUES MACHINES.

d'eux agissait directement sur l'extrémité supérieure de l'un des huit mâts formant le cadre D, ainsi qu'on le voit sur la fig. 203.

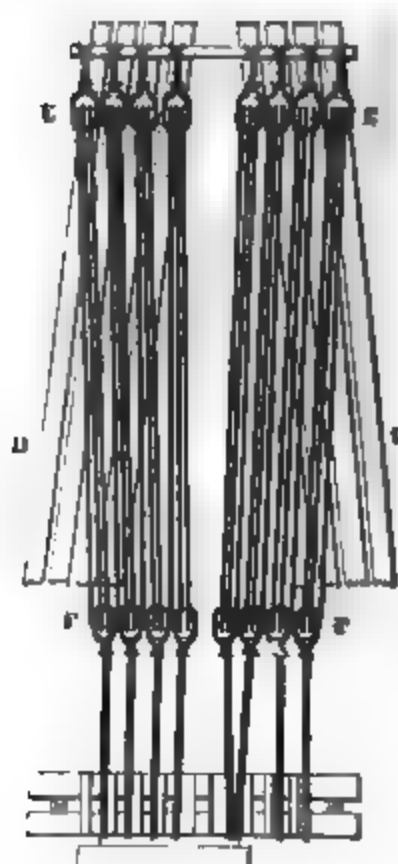


Fig. 203.

Une étude attentive de la disposition que devaient prendre les diverses parties de l'appareil, pendant toute l'opération, a fait voir que la résistance que chaque système de moufles aurait eu à exercer, sur son point d'attache au cadre D, ne dépasserait pas 43 000 kilogrammes. Ces moufles étaient d'ailleurs formées chacune de trois poulies réunies dans une même chape, de sorte que la corde qui passait sur les diverses poulies d'un même système formait six cordons parallèles, également tendus. Pour que la résistance exercée par l'ensemble de ces six cordons fût de 43 000 kilogrammes, il fallait donc que la tension de la corde fût d'un peu plus de 2000 kilogrammes. Ainsi les huit cordes qui se détachaient des huit systèmes de moufles, et qui étaient rendues horizontales à l'aide des poulies H, fig. 200, devaient servir seules à exercer toute la résistance nécessaire, pour laisser descendre lentement l'obélisque; et la tension de chacune

d'elles ne devait guère dépasser 2000 kilogrammes, au moment où elles auraient à produire la plus grande résistance. Voici par quels moyens une pareille tension a été obtenue.

Chaque corde, après s'être détachée horizontalement d'une des poulies H, venait s'enrouler sur une espèce de treuil K, sur lequel elle faisait deux tours; puis elle le quittait pour venir s'enrouler autour d'un mât fixe L, fig. 204, ensuite elle changeait de direction, en passant sur une poulie de renvoi portée par la pièce M; enfin, après s'être encore enroulée autour d'un second mât fixe N, elle venait aboutir dans les mains d'un matelot. Pour que l'obélisque pût descendre, il fallait que les moufles supérieures s'éloignassent des moufles inférieures, et qu'en conséquence une longueur de corde, de plus en plus grande, vint s'engager dans les systèmes de moufles. Les diverses portions de la corde, à mesure que le matelot la laissait filer dans ses mains, devaient donc glisser sur les surfaces de

IX. TRANSPORT ET ÉRECTION DE L'OBÉLISQUE. 199

fixes L, N, et faire tourner en même temps le treuil K, un mouvement de rotation pouvait se produire sans aucune réaction sur les verrous tout à l'heure quel était l'objet de ce treuil : nous pouvons concevoir tout de suite comment la résistance d'un homme sur la corde qu'il laissait filer entre ses mains suffirait pour déterminer une tension de plus de 2000 kilos sur la portion de cette corde qui s'engageait dans les moules ; cette tension devait, en outre, vaincre le frottement sur les deux mâts fixes L, N. Ainsi, par la disposition

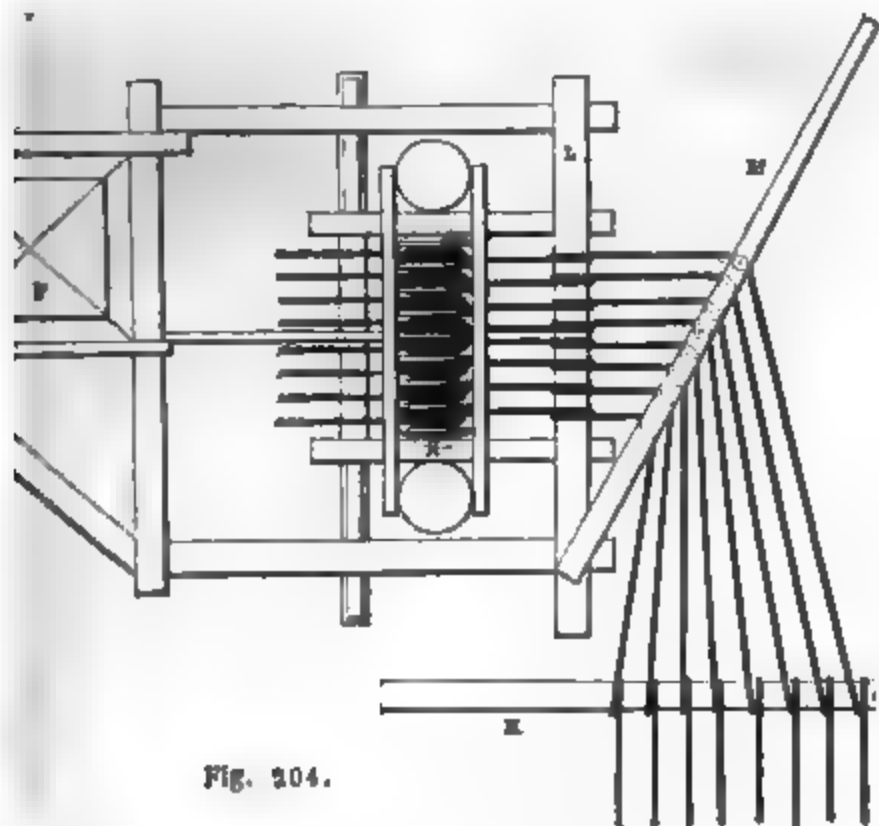


Fig. 204.

huit matelots, en retenant convenablement les cordes sur lesquelles ils agissaient, pouvaient maintenir l'obélisque en équilibre dans une quelconque des positions qu'il devait prendre en route ; et, en lâchant ces cordes, ils pouvaient le laisser descendre avec toute la lenteur nécessaire au succès de l'opération. L'expérience a prouvé que, lors même que la résistance à vaincre devait être la plus grande, ces matelots n'ont pas eu à dépasser de la moitié de leur force.

Le treuil K, sur lequel chaque corde faisait deux tours, et qui tournait librement, à mesure que les cordes marchaient, ne contribuait pas à augmenter leur tension ; il constituait cependant une des

200 APPLICATION A L'ÉTUDE DE QUELQUES MACHINES.

parties les plus importantes de l'appareil, et a été d'une grande utilité pour la réussite de l'opération. Il était destiné à empêcher qu'il n'y eût des tensions inégales dans les parties des huit cordes qui étaient engagées dans les moufles. Si un des matelots exerçait sur sa corde une résistance moins grande que les autres, sa corde aurait glissé plus facilement sur les mâts L. N; elle aurait marché plus que les autres cordes, et sa tension dans les moufles aurait été plus faible. Les moufles correspondant à cette corde n'exerçant pas sur le cadre D toute la résistance qu'elles devaient exercer, les autres moufles auraient eu à résister plus fortement que si la tension eût été régulière. Or, il aurait pu arriver de là que certaines moufles eussent à supporter une charge beaucoup plus forte que celle pour laquelle elles avaient été construites; si ces moufles s'étaient rompues sous cet excès de charge, les autres se seraient trouvées à leur tour trop chargées, et tout l'appareil de retenue aurait rompu. L'emploi du treuil K a eu pour objet de s'opposer à ce grave accident, en maintenant de l'uniformité dans les tensions des huit cordes, et faisant ainsi que la résistance à exercer fût régulièrement répartie entre les huit systèmes de moufles. On voit, en effet, que, toutes les cordes s'enroulant à côté les unes des autres sur le treuil K, ce treuil, en tournant, les laissait marcher toutes d'une même quantité; en sorte que leurs tensions dans les moufles, dès le commencement de l'opération, devaient se conserver égales pendant toute sa durée. Si un matelot venait à laisser filer facilement sa corde, la tension de cette corde diminuait jusqu'à ce qu'elle fût sur le treuil: mais cette diminution ne pouvait être assez forte pour que la corde glissât sur le treuil, et en conséquence, de l'autre côté du treuil, sa tension était la même que celle de toutes les autres cordes. Le treuil K avait donc pour objet de répartir uniformément, entre les diverses cordes, l'ensemble des tensions résultant des résistances inégales des huit matelots, de telle sorte que les tensions des 48 cordons qui réunissaient les moufles inférieures aux moufles supérieures fussent exactement les mêmes. Par ce moyen on pouvait employer, pour exercer une résistance de 13 000 kilogrammes, des moufles dont les dimensions avaient été calculées sur une charge de 45 000 kilogrammes seulement; et avec de pareilles moufles, l'opération n'aurait probablement pas réussi, si le treuil K n'avait distribué régulièrement la résistance.

La fig. 204 fait voir que la surface du treuil K n'était pas simplement cylindrique: elle présentait comme huit gorges de profondeur égale, dans chacune desquelles venait s'enrouler une des cordes. Il est facile de faire comprendre la nécessité de cette disposition. Si

TRANSPORT ET ÉRECTION DE L'OBÉLISQUE. 201

le fasse quelques tours sur un cylindre, et s'en déd'autre, comme on le voit dans la *fig* 66 (page 54), que, lorsque le cylindre tournera, la corde s'enroule déroule de l'autre. Il est clair que la corde ne se j jours en contact avec les mêmes points de la surface : les spires suivant lesquelles elle s'enroulera succéderont à côté les unes des autres, la corde marchera sur le cylindre, et viendra bientôt le toucher à une de ses extrémités, et précisément ce qui serait arrivé pour les cordes du treuil K, si la surface de ce treuil eût été cylindrique. Pour éviter à cet inconvénient, qui aurait fait manquer l'opération, on pratiqua sur la surface du treuil huit rainures en forme de poulies, dans chacune desquelles une des cordes devait rester. Ces espèces de gorges de poulies présentèrent une surface conique, que la corde devait envelopper. Pendant la descente, la corde s'enroulait sur la partie la plus grosse du rebord et se détachait du fond de la gorge : elle tendait à glisser sur ce rebord : mais elle glissait constamment, et était toujours ramenée au fond de la gorge.

On ne put pas de pouvoir donner aux 48 cordons qui réunissaient les moules supérieures aux moules inférieures des tensions assez grandes pour soutenir l'obélisque dans sa chute : on craignait que les moules inférieures fussent attachées en des endroits où n'y avait pas une assez grande résistance, pour ne pas céder à la traction qu'ils devaient avoir à supporter. A cet effet, on prit des pièces de bois furent solidement fixées à la base d'un poutrelle P, qui existait de l'autre côté de l'entrée du palais, et les moules inférieures furent attachées à ces câbles d'une grande résistance.

La descente de l'obélisque de sa base, par les moyens qui ont été décrits, eut lieu sans accident le 31 octobre 1831, en l'espace de 25 minutes.

On a vu dans le plan incliné qui devait servir au transport de l'obélisque, que l'on avait imaginé de

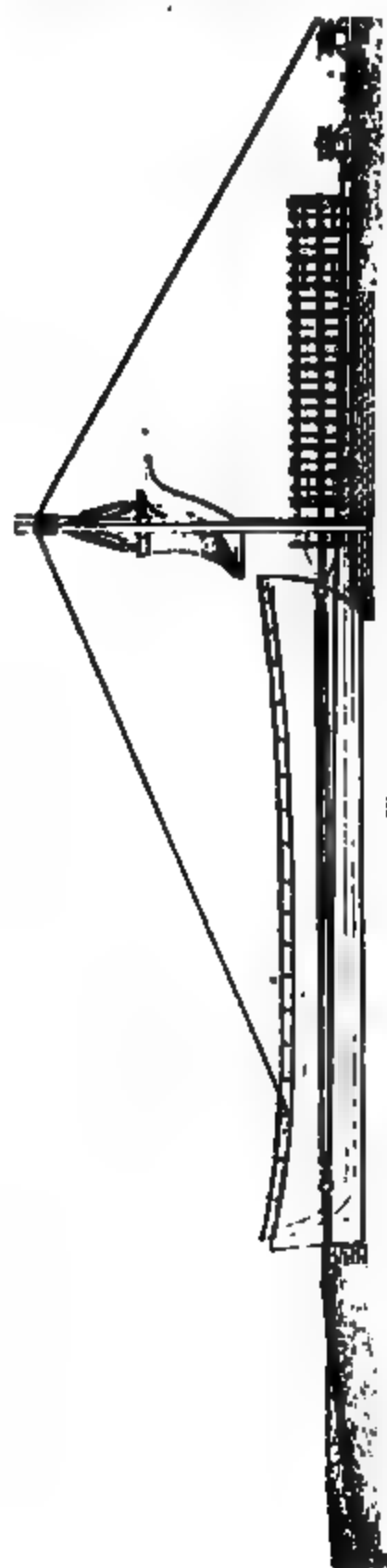


Fig. 205.

sous le poids énorme qu'elle supporter, et l'obélisque co descendre, sans cesser de lon tour de la pièce A, jusqu'à c résistance opposée par son appui fût assez forte pour vain poids. Mais alors l'obélisque sur une large surface, à l'inté laquelle passait la verticale co dant à son centre de gravité; que le mouvement de basc lequel on comptait, ne s'est j duit.

Pour amener l'obélisque couché sur le haut du plan on a dû soulever sa base, à l moufles et de cabestans, et le même temps par le sommet, le faire glisser dans le sen longueur A partir de là, on eu qu'à le faire glisser sur longueur du plan incliné, en l a l'aide de cabestans qu'on d à mesure qu'il avançait. O soin, pour faciliter le glisse recouvrir le chemin de ma qu'on enlevait successivement partie que l'obélisque venait ter, pour les reporter en av la partie du chemin qu'il allai dre Ces madriers étaient e ment graissés, afin de dimi frottement

Enfin, lorsque l'obélisque près du navire, dont on avai la partie antérieure, on le tir dans son ntérieur en disposa pareil de traction, comme l'in fig. 205. Lorsque l'obélisque venablement installé, on refer verture qui avait été pratiqué navire, en rapprochant l

TRANSPORT ET ERECTION DE L'OBÉLISQUE. 203

levée, et la fixant assez solidement pour qu'il n'y eût ni de rupture pendant toute la traversée.

Le navire se mit en marche pour la France le 26 août 1832, et arriva à Paris, près la place de la Concorde, le 23 décembre 1833.

On disposa tout, pour le débarquement et l'érection de l'obélisque. Les moyens qu'on employa pour cela sont exactement les mêmes que ceux qui avaient servi, en Egypte, à faire les opérations.

Pour la partie antérieure du navire, pour rétablir l'ouverture par laquelle l'obélisque avait été introduit : on tira l'obélisque, à l'aide de cabestans, pour le faire sortir du *Luxor*, et le faire monter sur le quai par un plan incliné. Pour l'embarquer, on l'avait tiré par la tête en avant ; il dut marcher en sens contraire pour le débarquement : sa base se présentait la première.

Quand il fut arrivé sur le quai, on le tira le long d'un plan incliné, établi à cet effet, et qui aboutissait au niveau de la face supérieure du piédestal sur lequel on devait le dresser. Il fut ainsi amené dans une position telle, qu'il n'avait plus qu'à tourner autour de son axe inférieure de sa base, pour venir se placer sur son piédestal. Le mouvement de rotation s'effectua, comme pour la descente, à l'aide d'une forte pièce de bois, qui embrassait dans toute sa longueur l'arc de cercle dont on vient de parler, et qui devait tourner, en même temps que l'obélisque, autour de sa surface extérieure, pour produire à cet effet. Pour cela, il fallut d'abord soulever l'obélisque par sa tête, jusqu'à ce que son centre de gravité eût dépassé le plan vertical mené par l'axe de rotation : à partir de là, il continua à tourner, en vertu de l'action de la pesanteur, sa base vint s'arrêter sur la face supérieure du piédestal, et il prit ainsi la position qu'on lui laissait définitivement.

L'appareil qui servit à soulever l'obélisque, dans la première partie de l'opération, c'est-à-dire jusqu'à ce que son centre de gravité atteignît le point le plus haut du cercle qu'il devait décrire, était exactement le même que l'appareil de retenue employé pendant la descente, et décrit précédemment. Seulement les câbles, au lieu d'être détachés des systèmes de mouffles, ne s'enroulaient plus sur des mâts fixes sur lesquels ils devaient glisser, et n'aboutissaient plus entre les mains d'autant d'hommes qui devaient les tirer à la fois : ces câbles venaient s'enrouler sur les tours d'un même système de cabestans, à l'aide desquels on exerçait sur eux une traction suffisante.

Pendant la seconde partie de l'opération, lorsque l'obélisque fut parvenu à sa position, plus qu'à céder à l'action de la pesanteur pour achever sa

204 APPLICATION A L'ÉTUDE DE QUELQUES MACHINES.

rotation, il fut retenu par des câbles attachés à sa tête, et c'étaient les câbles de traction employés en Egypte pour commencer l'opération de la descente.

L'érection de l'obélisque à Paris eut lieu le 25 octobre 1833. Tous les travaux de descente en Egypte, de transport de l'Égypte en France, et d'érection à Paris, furent effectués sous la direction de M. Lebas, ingénieur de la marine. L'idée de l'appareil de remontage pour la descente, est de M. Mimerel, autre ingénieur de la marine.

§ 149 **Moulins à farine.** — Pour extraire des grains la farine qu'ils contiennent, on les broie entre deux pierres : l'enveloppe de chaque grain se trouve brisée ; ses débris, qu'on désigne sous le nom de son, se mêlent à la farine ; et il ne reste plus qu'à séparer à l'aide d'un tamis, qui laisse passer la farine à travers

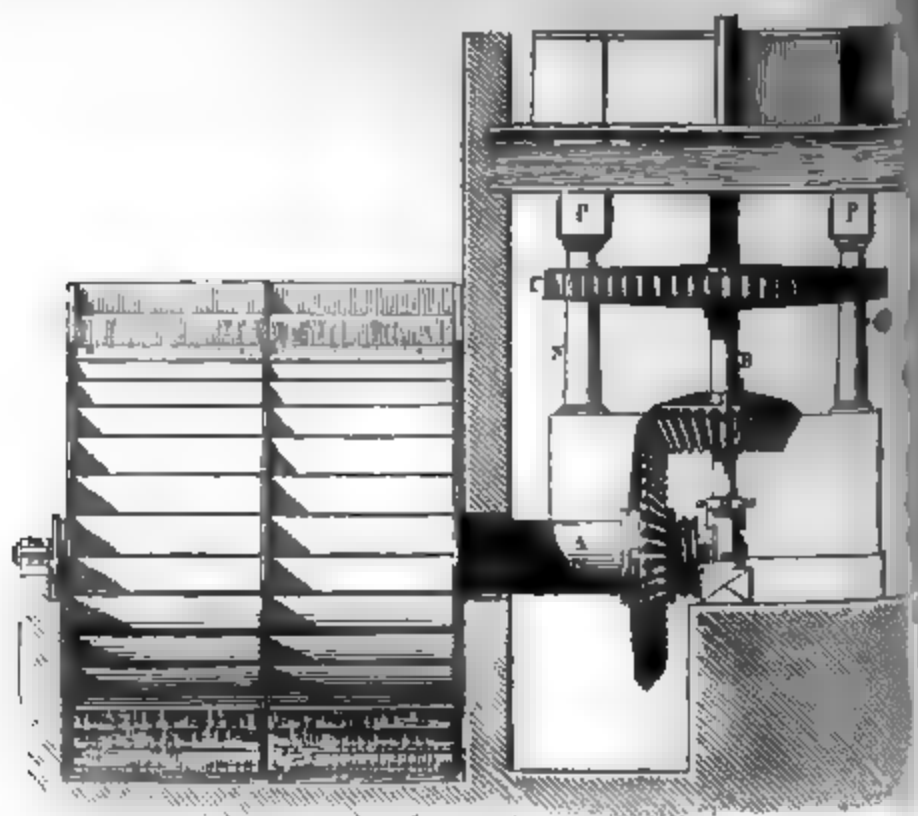


Fig. 206.

tissu, sans laisser passer le son. C'est dans les moulins à fort que s'effectuent ces opérations : nous allons voir quelle est la disposition de la partie de ces moulins dans laquelle les grains sont broyés.

Les pierres, ou meules, qui servent à effectuer cette opération

ndant longtemps mises en mouvement par des hommes
naux. Maintenant elles sont toujours mues, soit par l'eau,
vent, soit par la vapeur. Les *fig* 206 et 207 représen-
sposition d'un moulin à eau. Une roue hydraulique est
ouvement par une chute d'eau. Nous ne nous arrêterons
ette roue, sur laquelle nous reviendrons plus loin, pour
re compte de la manière dont l'eau la fait tourner. L'ar-
a roue hydraulique, *fig*. 206, pénètre à l'intérieur du bâti
i renferme le moulin, et communique son mouvement
n a un arbre vertical B, à l'aide de roues d'angle. Sur
est fixée une grande roue dentée horizontale C; et cette
communique son mouvement à deux meules, par l'in-
re de deux autres roues dentées plus petites D, E, *fig*. 207.
de ces deux roues peut glisser le long de l'arbre vertical

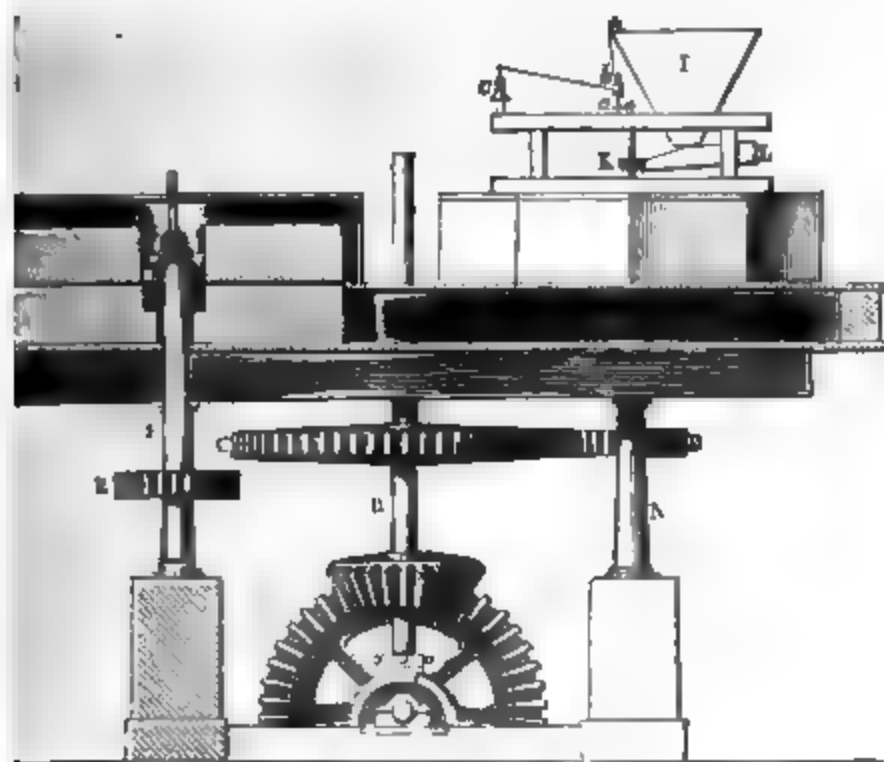


Fig. 207.

uel elle est montée, et lorsqu'on l'a amenée ainsi dans la
où elle doit rester, on la fixe sur son arbre à l'aide de coins
ntroduit entre elle et l'arbre, dans des rainures pratiquées à
t. De cette manière, les roues D, E, peuvent être placées à
ur de la grande roue C, afin d'engrener avec elle; ou bien

206 APPLICATION A L'ÉTUDE DE QUELQUES MACHINES.

on peut les abaisser au-dessous de cette roue, pour supprimer la communication de mouvement. La *fig. 207* montre la roue D placée de manière à tourner sous l'action de la roue C; tandis que la roue E, n'engrenant pas avec cette roue C, n'en reçoit aucun mouvement. On peut donc, à volonté, faire marcher les deux meules à la fois, ou bien n'en faire marcher qu'une seule, suivant les besoins. La *fig. 207* montre les deux paires de meules qui correspondent aux deux roues D, E: mais elle ne les montre pas de la même manière. La portion de gauche de cette figure est une coupe destinée à faire voir la disposition relative des deux meules, entre lesquelles le grain est broyé. La portion de droite, au contraire, est une élévation qui montre l'enveloppe octogone de bois, à l'intérieur de laquelle se trouvent les meules, ainsi que l'appareil placé au-dessus, et destiné à leur fournir le grain.

L'arbre F, sur lequel est montée la roue E, traverse une première meule qui reste fixe, et qu'on nomme *meule dormante*; il s'élève un peu au-dessus, et supporte sur sa tête la seconde meule, ou *meule courante*. Cette seconde meule n'a pas d'autre point d'appui: son centre de gravité doit être tellement placé, que sa face inférieure se maintienne horizontale, afin qu'il existe tout autour une même distance entre les deux meules. Pour satisfaire à cette condition, c'est-à-dire pour *équilibrer* la meule courante, on ajoute du plâtre en divers points de sa face supérieure, jusqu'à ce qu'elle ne penche pas plus d'un côté que de l'autre. Pour que les deux meules aient entre elles une distance convenable, on élève ou l'on abaisse la meule courante; on y parvient en faisant monter ou descendre, à l'aide d'une vis, la crapaudine sur laquelle repose le pivot inférieur de l'arbre F.

Le grain qui doit être soumis à l'action des meules est placé dans une trémie I: à la partie inférieure de cette trémie, existe une ouverture dont la grandeur peut être réglée à volonté. Immédiatement au-dessous est suspendue une petite auge inclinée L, son mode de suspension lui permet d'osciller facilement, sous l'action des oreilles K, fixées à un prolongement de l'axe qui supporte la meule courante. Lorsque la meule tourne, ces oreilles K viennent successivement choquer latéralement l'auge L, et déterminent l'écoulement d'une petite quantité du grain contenu dans la trémie. Le grain qui tombe ainsi, peu à peu, pénètre dans une ouverture centrale de la meule courante, ouverture qui n'est interceptée qu'en partie par la pièce de fer qui sert à suspendre la meule sur la tête de l'arbre F: il arrive, de cette manière, au centre de la face supérieure de la meule dormante, et s'engage entre les deux

es. L'ouverture centrale de la meule dormante, dans laquelle se trouve l'arbre F, est garnie de cuir et de drap, afin d'éviter que le grain ne la traverse pour tomber au-dessous de cette meule. La meule courante tend à entraîner chaque grain dans son mouvement de rotation : et comme il n'existe qu'une faible distance entre les deux meules, le grain est broyé en même temps qu'il est entraîné. Une parcelle qui est mise en mouvement décrirait une circonférence de cercle, si elle était attachée à la meule courante ; mais, si elle n'y est pas attachée, elle en reçoit seulement des impulsions successives, et, en vertu de chacune de ces impulsions, elle se déplace suivant la tangente au cercle que décrit la partie correspondante de la meule. Il en résulte que les poussières qui proviennent de l'écrasement du grain s'éloignent du centre de la meule dormante, en même temps que la meule courante les fait tourner autour de ce centre. Le mélange de farine et de son, ainsi transporté vers la circonférence des deux meules, finit par les abandonner, et vient s'accumuler dans un espace annulaire qui existe tout autour de la meule courante. Arrivé dans cet espace annulaire, il est encore entraîné par la meule, et vient tomber dans un trou percé en un point de son contour. De là le mélange de farine et de son est conduit dans des appareils destinés à opérer la séparation de la farine et du son. Ces appareils, ainsi que ceux qui servent à nettoyer le grain avant de le moulin, sont également mis en mouvement par la roue hydraulique : à cet effet, l'arbre B se prolonge à travers le plancher qui est au niveau des meules, et monte, vers sa partie supérieure, les roues et tambours nécessaires à cette transmission de mouvement.

Une sonnette c est disposée de manière à avertir le meunier, lorsque la trémie ne contient presque plus de grain. La sonnette est reliée par une ficelle à un taquet de bois, b, qui est traversé par la tige verticale de fer. Ce taquet peut monter ou descendre le long de cette tige, et peut également tourner autour d'elle, sans la moindre difficulté : il est soutenu par une autre ficelle qui pénètre dans la trémie en passant sur une petite poulie, et qui se termine en un morceau de bois assez léger. Ce morceau de bois est enfoncé dans le grain de la trémie, et s'y maintient tant que le grain est en quantité suffisante, de manière à soutenir le taquet b à une hauteur convenable ; mais lorsqu'il n'y a presque plus de grain dans la trémie, le taquet b retombe, en faisant remonter le morceau de bois, qui n'est plus retenu par le grain. Dès lors, un doigt a, qui est fixé au prolongement de l'arbre de la meule courante, et qui tourne en même temps que cette meule, vient choquer le taquet b

208 APPLICATION A L'ÉTUDE DE QUELQUES MACHINES.

à chaque tour, et fait ainsi sonner la sonnette. Le bruit qui en résulte ne cesse de se faire entendre qu'après que le meunier ayant rempli la trémie, a enfoncé dans le grain le morceau de bois qui soutient le taquet *b* au-dessus du doigt *a*.

Des colonnes *N*, au nombre de quatre, reposent sur deux blocs de pierre, et supportent deux fortes pièces de bois *P*, sur lesquelles sont installées les deux meules dormantes. Les mêmes blocs de pierre portent les crapaudines sur lesquelles s'appuient les arêtes des meules courantes.

§ 430. Les meules sont quelquefois formées d'un seul morceau de pierre; mais alors elles sont généralement défectueuses. Les meilleures meules sont construites par la réunion de plusieurs pierres bien choisies, liées entre elles par du plâtre, et fortement consolidées par des cercles de fer. Le diamètre d'une meule, dans les anciens moulins, vario de 1^m,80 à 2^m,30; mais dans les nouveaux moulins, dits à l'anglaise, les meules n'ont que 1^m,30 de diamètre. Les meules qui sont formées de pierres choisies, ne présentant pas de cavités, ont besoin d'être taillées d'une manière particulière pour

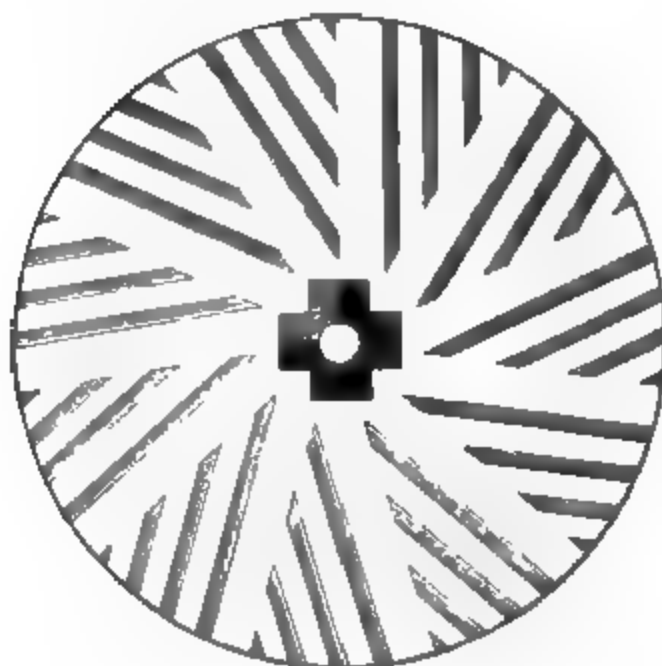


Fig. 208.

que leur surface ne soit pas tout à fait unie. On y pratique habituellement des espèces de sillons, dirigés du centre à la circonférence, et disposés comme l'indique la fig 208. Les sillons ne sont pas tracés suivant des rayons, mais présentent au contraire une obliquité très prononcée sur leur direction, et cela dans le même sens sur les faces de chacune des deux meules. On comprend aisément, d'a-

près cela, que, lorsque ces deux faces sont appliquées l'une sur l'autre, ce qui n'a pu se faire qu'en retournant la meule courante, les sillons de cette meule font un angle avec ceux de la meule

inte, au-dessus desquels ils sont placés ; et, pendant que la courante tourne, les bords de ces sillons agissent comme des lames d'une paire de ciseaux on ferme. Les sillons n'ont que une profondeur, et cette profondeur en diminuant progressive- d'un bord à l'autre bord, où elle duit à rien. La *fig. 209* est une e faite dans les deux meules, pla- l'une au-dessus de l'autre, afin de trer la forme de la section transversale des sillons, et la manière ils se présentent sur l'une et l'autre meule. La flèche indique ns du mouvement de la meule supérieure.

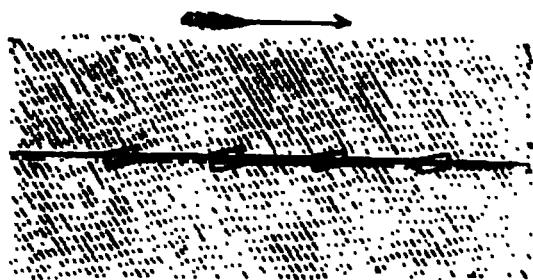


Fig. 209.

ne paire de meules peut moudre de 45 à 46 hectolitres de blé 24 heures. On a reconnu que, pour obtenir une bonne mouture, oit faire faire à la meule courante environ 70 tours par minute. en déduira sans peine le nombre de tours que devra faire l'arbre a roue hydraulique dans une minute, à l'aide des nombres de ls des roues dentées qui établissent la communication de mouve- t depuis cet arbre jusqu'à la meule. On disposera en consé- nce la roue hydraulique de telle manière que, sous l'action de hute d'eau, elle prenne la vitesse qu'on aura ainsi trouvée.

151. Scieries mécaniques. — Le mouvement régulier que doit idre une scie, pour scier le bois, peut être produit par une ma- ie mue, comme un moulin, soit par un cours d'eau, soit par le t, soit par la vapeur. On obtient même par là des résultats bien érables à ceux qu'on pourrait obtenir avec des scies mues à la n. Les scies mécaniques sont très fréquemment employées dans pays de montagnes, où de nombreuses chutes d'eau permettent ébiter les bois presque sans frais. En Hollande, il existe de ps immémorial des scieries qui marchent par l'action du vent. omme exemple de ce genre de machines, nous prendrons une scies de la scierie mécanique de Saint-Maur, près Paris. Cette rie contient seize scies, qui reçoivent toutes leur mouvement e chute d'eau agissant sur une turbine. La plupart des scies ent a fabriquer des feuilles d'acajou pour le placage : quelques sont employées à faire des planches. C'est une des premières nous allons décrire.

a turbine, qui reçoit l'action de l'eau, fait tourner un arbre hori- ai, ou arbre de couche, qui s'étend dans toute la longueur de lier. Sur cet arbre sont adaptés, de distance en distance, des ours. A. *fig. 210*, qui reçoivent sur leur contour des courroies

210 APPLICATION A L'ÉTUDE DE QUELQUES MACHINES.

sans fin, destinées à transmettre le mouvement de l'arbre aux canismes des scies. Chaque courroie vient embrasser un second tambour B, de plus petit diamètre que le tambour A, et lui communique un mouvement de rotation très rapide. Elle a besoin pour cela d'avoir une tension suffisante, sans quoi elle glisserait sur le tambour B : cette tension est déterminée par la pièce de bois CD, tournant librement autour d'un boulon D, et s'appuyant sur la courroie par le galet C, qui tourne en même temps

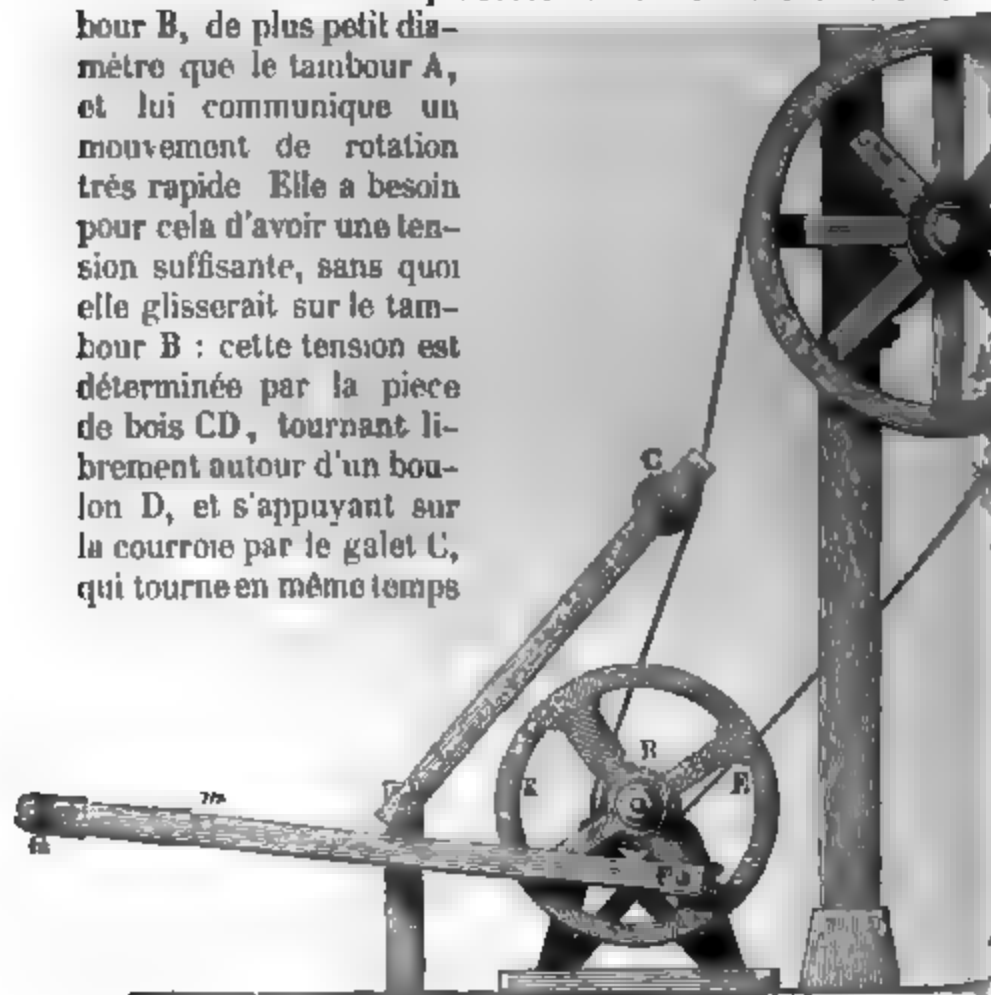


Fig. 210.

que la courroie marche. Pour arrêter le mécanisme qui communique avec le tambour B, il suffit de relever la pièce de bois CD : la courroie n'est plus tendue, et elle marche sans entraîner le tambour sur la surface duquel elle glisse.

Un volant E est adapté à l'extrémité de l'axe du tambour B : des rayons du volant portent un boulon F, qui traverse l'extrémité d'une bielle FG. Cette bielle, articulée en G au châssis de la scie, est mise en mouvement par le volant, comme par une manivelle ; son extrémité G prend un mouvement de va-et-vient, suivant la ligne horizontale mn.

Le châssis de la scie, qui est placé horizontalement, a, comme l'ordinaire, la forme d'un rectangle traversé en son milieu, dans le sens de sa longueur, par une tringle de bois HH, fig. 211 ; w

rectangle, celui qui est en arrière de la tringle III, est la lame de scie II, dont les deux faces sont verticales, et les bords sont tournés vers le bas: l'autre côté du rectangle

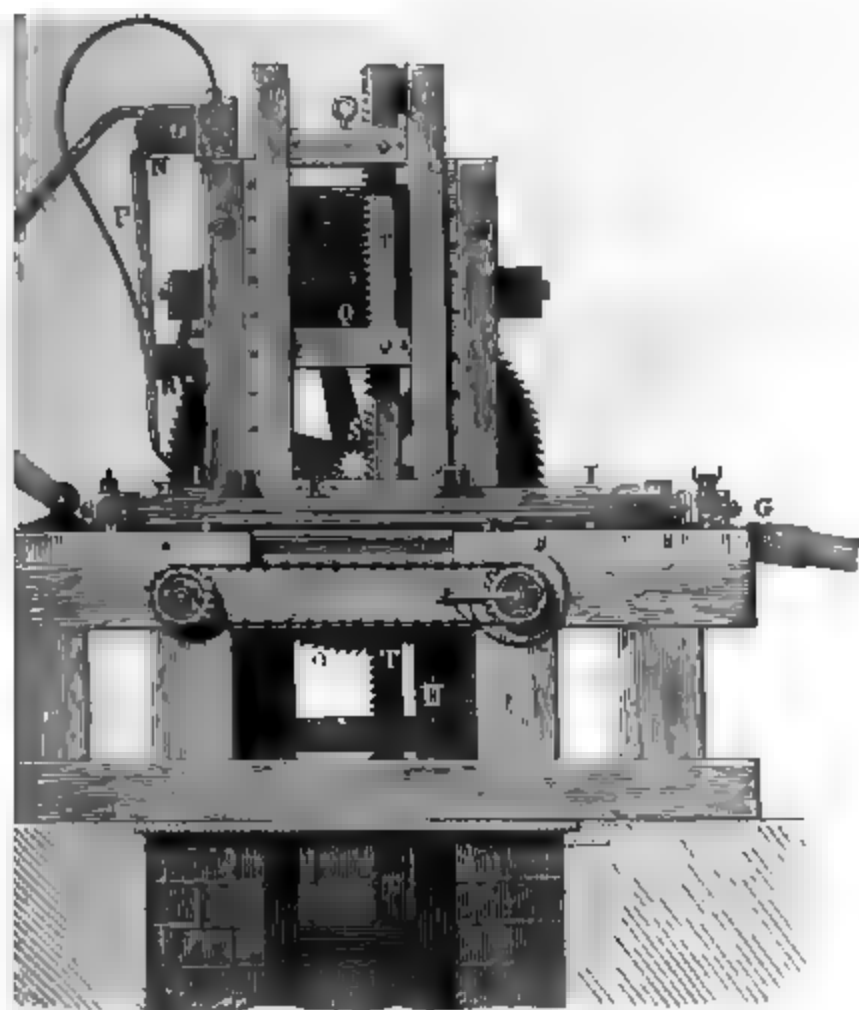


Fig. 211.

est maintenue par une tige de fer, placée en avant de la tringle III, et dont les extrémités sont garnies de filets de vis et d'écrous, destinés à exercer une forte tension sur la lame de scie, dans le sens de sa largeur. Contre la face antérieure de la lame de scie, se trouve une tige K, taillée en biseau le long de son bord inférieur, et destinée à maintenir la lame de scie toujours exactement dans la position, pendant qu'elle est animée du mouvement rapide de va-et-vient, qui lui est transmis par la bielle articulée en G. Le mouvement du châssis est d'ailleurs dirigé d'une manière précise par des guides de fer qui glissent dans des coulisses fixées au support fixe.

212 APPLICATION A L'ÉTUDE DE QUELQUES MAC

D'après la manière dont la scie est disposée, elle ne peut ni s'abaisser ; dans son mouvement de va-et-vient, elle se déplace exactement à la même hauteur. Il est donc nécessaire d'acajon qui doit être scié se déplace afin de se présenter aux dents de la scie ; voici la disposition qui peut atteindre ce but. Le morceau d'acajou X, fig. 212

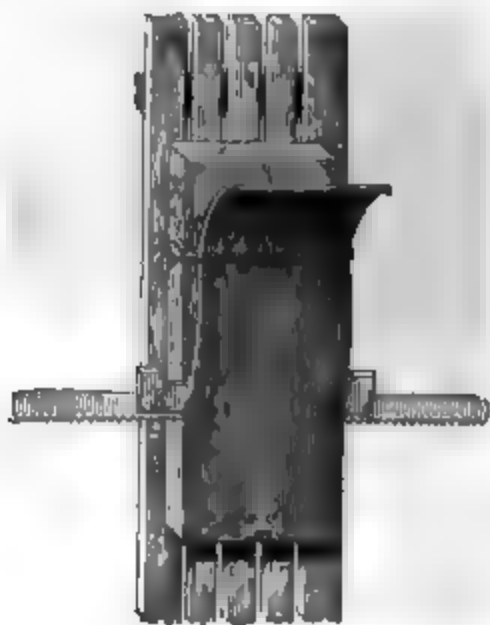


Fig. 212.

la colle forte sur un châssis est ensuite de boulons et d'écrou U U, fig. 214, qui peuvent se déplacer verticalement, et qui sont fixés dans ce mouvement par des languettes de fer glissant dans des coulisses, comme le mouvement de la scie. Une tige articulée d'un bout à l'autre du châssis de la scie, et de l'autre bout par la tige qui pour cela se recourbe. Les deux points M et N forment les bras d'un levier qui tourne autour du point O, sorte que le mouvement

qui vient du cadre de la scie détermine un mouvement du bras de levier N autour du point O, par l'intermédiaire de la tige L, et du long bras de levier M. A l'extrémité du bras M est articulée une tige P, qui se termine par une petite bêche (pied-de-biche) ; ce pied-de-biche vient s'engager entre la roue Q, et y est maintenu par un grand ressort courbé qui reste toujours sur le contour de la roue. Un autre pied-de-biche en un point fixe, s'engage de même entre les dents de la roue et y est également maintenu par un petit ressort à bout de tige. Les oscillations continues du bras de levier N, le pied-de-biche P s'élève et s'abaisse successivement : lorsqu'il s'élève, il glisse sur les saillies des dents de la roue Q ; mais lorsqu'il saisit une de ces dents, et la force à s'abaisser, ce qui fait tourner la roue. Le pied-de-biche R n'a d'autre objet que d'empêcher la roue Q de se mouvoir en sens contraire, pendant que le pied-de-biche P remonte. L'axe de la roue Q porte une engrenure avec une crémaillère T faisant corps avec le châssis. On voit donc que, pendant que la scie est animée d'un

èce d'acajou sur laquelle elle doit agir, et qui est chée au cadre UU, monte d'un mouvement lent scie peut donc pénétrer dans le morceau d'acajou en deux parties.

on a besoin d'obtenir des feuilles d'acajou extrême-
 sorte que ces feuilles sont flexibles, et lorsque la
 ie longueur déjà un peu grande, elles ne peuvent
 elles-mêmes. La *fig. 212* montre de quelle ma-
 ces feuilles d'acajou, pendant que l'opération
 scie en détache une longueur de plus en plus
 do fer biseauté K, qui est appliquée contre la
 a lame de scie, écarte la feuille d'acajou du mor-
 lus haut, cette feuille est embrassée par une sorte
 fer, qui fait ressort, et dont les extrémités recour-
 ées l'une de l'autre, pour venir s'appuyer sur les
 morceau d'acajou.

de l'appareil qui supporte le cadre UU peut se
 e à l'avant. Ce mouvement se produit à l'aide de
 es, dont les têtes V, V, apparentes sur la *fig. 214*,
 aux petites roues dentées du même diamètre. Une
 brasse ces deux petites roues, en sorte que l'une
 pas tourner sans que l'autre tourne exactement
 ité et dans le même sens. Une manivelle, fixée à
 à les faire mouvoir. A l'aide de cette manivelle,
 deux vis, qui sont disposées de manière à ne pas
 ens de leur longueur; les écrous qui sont enga-
 sont donc obligés de marcher en avant ou en ar-
 on fait tourner la manivelle dans un sens ou dans
 nent dans ce mouvement le cadre UU auquel ils
 coit qu'à l'aide d'un pareil mécanisme, on puisse,
 icer un nouveau trait de scie, faire avancer ce
 eau d'acajou qui lui est attaché, d'une quantité
 petite qu'on voudra, et que, par conséquent, on
 feuilles d'une épaisseur très petite et toujours la

xour A, *fig. 210*, fait environ 55 tours par minute;
 t 5 fois plus grand que celui du tambour B, celui-
 tours par minute: c'est aussi le nombre de coups
 dans le même temps. A chaque coup de scie, le
 monte d'environ $\frac{1}{2}$ millimètre. Avec une scie de
 obtenir 36 mètres carrés de feuilles dans un jour.
 on fait avancer le morceau d'acajou à l'aide des

Les scies mécaniques employées pour faire des planches sont disposées verticalement, et marchent moins vite que les scies horizontales : elles ne donnent que 110 à 140 coups par minute. On fait marcher le morceau de bois, à chaque coup, d'une quantité dont on fait varier l'épaisseur, qui varie de 2 à 5 millimètres, suivant la dureté du bois.

§ 453. **Marteaux de forges.** — Les gros marteaux, vent, dans les forges, à travailler les fortes pièces de fer, en mouvement par des roues hydrauliques ou des machines à vapeur : nous donnerons pour exemple de ces marteaux celui représenté par la *fig. 213*, et qui fonctionne dans les ateliers de M. Cavé, à Paris.

La tête A du marteau est de fonte, et pèse plus de 47 grammes. Elle est percée d'une large ouverture, dans laquelle l'extrémité du manche B, qui y est fixé à l'aide d'un manchon porte, vers le milieu de sa longueur, deux tourillons l'un d'un côté, l'autre de l'autre : ces tourillons sont supportés par deux coussinets adaptés, en C, à deux fortes pièces de bois calées entre lesquelles passe le manche du marteau. Des came D, D, fixées à un arbre horizontal, viennent successivement pendant la rotation de l'arbre, appuyer sur la queue du manche du marteau est soulevé, retombe, est soulevé de nouveau, et ainsi de suite. L'arbre qui porte les came D, D, reçoit son mouvement de rotation d'une machine à vapeur qui agit sur la manivelle volant F, exactement pareils, sont fixés sur cet arbre, l'un de chaque côté des came D, D, l'autre de l'autre côté. La figure ne représente qu'un seul de ces deux volants : celui qui est en avant et celui qui est en arrière.

ig levier GH, mobile horizontalement autour du petit axe

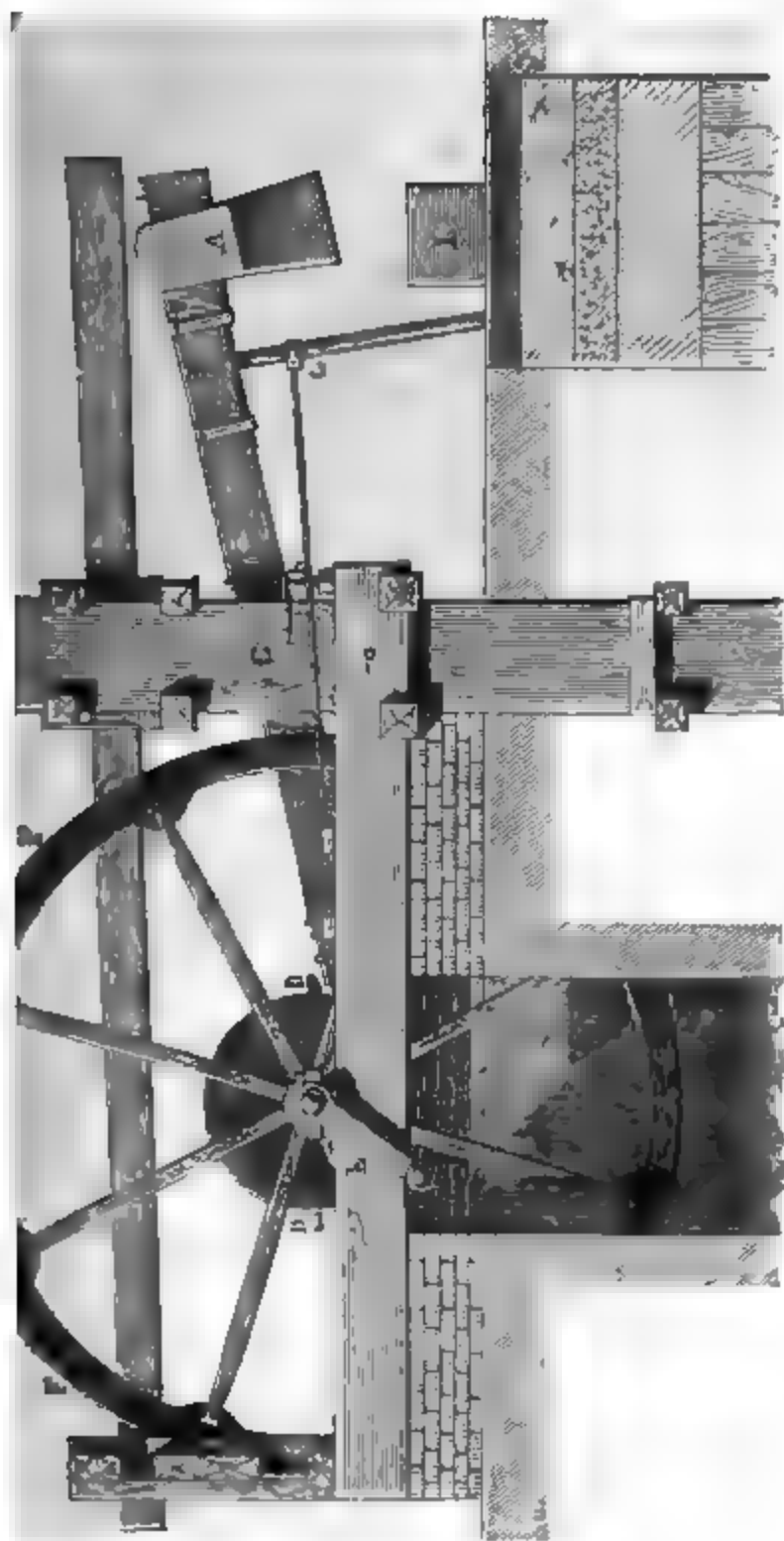


FIG. 213. Échelle de 12 millimètres pour mètre.

K, est fixé en G à une forte barre de fer, à l'aide de laquelle

on arrête le travail du marteau. A cet effet, pendant que le marteau fonctionne, on tire en avant l'extrémité H du levier de fer, attachée à l'autre extrémité G de ce levier, se reportant en arrière, et vient se placer sous le manche du marteau, à l'empêcher de retomber sur l'enclume L. Si les came continuent à agir sur la queue du manche, le marteau se soulève un peu : mais il ne tombe ensuite que d'une petite quantité, ainsi suspendu au-dessus de l'enclume, à une distance suffisante pour qu'on puisse facilement manœuvrer la pièce de fer à être forgée. Lorsqu'on veut mettre le marteau en activité pour marcher la machine à vapeur : l'arbre des came tourne jusqu'à ce qu'une came vienne à rencontrer la queue du marteau, le soulève un peu, et le laisse retomber aussitôt sur la base qui le soutient. On saisit alors le moment où le marteau est prêt pour pousser rapidement en arrière l'extrémité H du levier, l'extrémité G se trouve ainsi reportée en avant, en entraînant avec elle la pièce de fer qui soutenait le marteau, et celui-ci, ne rencontrant plus d'obstacle, tombe sur l'enclume.

§ 434. Il est aisé de voir pourquoi l'arbre des came ne peut pas être remplacé par un volant. Cet arbre est soumis à l'action incessante de la machine à vapeur, qui tend constamment à accélérer son mouvement, tant qu'il n'a de résistance à vaincre qu'au moment où une came se trouve en contact avec la queue du marteau. Le mouvement de rotation de l'arbre serait donc très irrégulier, si les volants n'étaient pas, en raison de la grande irrégularité des résistances, lui sont appliquées. Ce mouvement s'accélérerait sans cesse jusqu'au moment où une des came quitterait la queue du marteau, qu'à celui où l'autre came viendrait la saisir ; et aussitôt qu'une came commencerait, la vitesse de l'arbre diminuerait d'une quantité considérable. Nous avons vu (§ 132) que le but principal des volants est précisément d'empêcher cette grande variation de vitesse.

ment en mouvement toute la masse du marteau et de son manche. Le arbre des canes est donc soumis, au moment de ce choc, à l'action d'une force résistante énorme. S'il était muni d'un seul volant, il serait nécessairement placé à côté des canes, les chocs successifs qu'il éprouverait tendraient à le tordre : tandis que cet effet ne peut se produire, par suite de l'emploi de deux volants égaux, disposés symétriquement de part et d'autre des canes.

§ 155. On voit, sur la figure, une longue pièce de bois horizontale, qui passe entre les deux volants, et se prolonge jusqu'au-dessus de la tête du marteau. Cette pièce est destinée à augmenter le nombre des coups de marteau qu'on peut donner dans un même temps, sans pour cela diminuer l'intensité de chacun de ces coups. Pour s'en rendre compte, il faut observer que la came, en agissant sur le marteau, lui communique une certaine vitesse dirigée de bas en haut : lorsque la came l'abandonne, il continue à monter, en vertu de sa vitesse acquise, et s'il ne rencontrait pas d'obstacle, il monterait jusqu'à ce que l'action de la pesanteur eût complètement détruit sa vitesse ; alors il retomberait, et viendrait choquer la pièce de fer placée sur l'enclume avec la vitesse due à la hauteur dont il serait tombé (§ 88). Pour que le choc se produisît avec une vitesse déterminée, il faudrait donc, si les choses se passaient ainsi, que l'intervalle de temps compris entre deux coups de marteau fût assez grand pour que le marteau pût s'élever à la hauteur correspondant à cette vitesse, et retomber ensuite de toute cette hauteur ; en sorte que, plus la vitesse du marteau, au moment du choc, devrait être grande, moins ce marteau pourrait donner de coups dans un même temps. Si, au contraire, le marteau rencontre, en montant, un obstacle élastique qui l'empêche de s'élever davantage, et qui le renvoie avec une vitesse, dirigée de haut en bas, égale à celle qu'il avait au moment où il l'a rencontré, il retombera plus tôt, et les coups seront plus précipités, sans perdre de leur intensité. C'est dans ce but qu'on emploie la pièce de bois qui nous occupe. Elle présente une assez grande élasticité, pour que les choses se passent à peu près comme nous venons de le dire. Le choc de la tête du marteau contre cette pièce de bois diminue bien un peu l'intensité des coups de marteau, mais cette diminution est accompagnée d'une augmentation considérable dans la rapidité du travail.

Il ne faut pas croire cependant que le moyen qui vient d'être indiqué, pour augmenter le nombre de coups que le marteau peut donner pendant *un certain temps*, tout en affaiblissant un peu la *puissance* de chacun d'eux, accroisse la puissance de la machine,

c'est-à-dire lui fasse produire une plus grande quantité de travail utile, avec une même dépense de travail moteur. Si le marteau donne plus de coups en une heure, il faudra que la machine à vapeur agisse en conséquence, et développe une plus grande quantité de travail moteur : en général, la quantité de travail développée par cette machine sera proportionnelle au nombre de coups que le marteau donnera, quel que soit le temps que durera l'opération. L'emploi de la pièce de bois qui limite la course verticale du marteau présente plutôt un inconvénient qu'un avantage, sous ce rapport : puisque le choc du marteau contre cette pièce entraîne toujours une diminution dans la grandeur du coup qu'il donne en retombant, et que, par conséquent, avec une même quantité de travail moteur, on produit moins de travail utile.

§ 136. Nous avons dit précédemment (§ 443) qu'il fallait éviter, autant que possible, qu'il se produisît des chocs entre les diverses pièces d'une machine en mouvement. La machine dont nous nous occupons est loin de satisfaire à cette condition : mais les chocs qui ont lieu, pendant qu'elle fonctionne, ne jouent pas le même rôle, sous le rapport de la perte de travail qu'ils peuvent occasionner. D'abord le choc du marteau contre la pièce de fer qu'il s'agit de forger n'entraîne pas de perte de travail : c'est dans ce choc même que consiste le travail que la machine doit effectuer, et l'or ne peut pas chercher à l'éviter. La perte de travail produite par un choc entre des corps non élastiques est due, en grande partie, à la déformation permanente que ces corps éprouvent par l'effet du choc : et c'est précisément cette déformation qu'on veut obtenir ici, en employant le marteau. Seulement, comme l'enclume ne peut pas être rendue rigoureusement immobile, on a soin de la faire reposer sur un ensemble de pièces de bois, placées, les unes verticalement, les autres horizontalement : en sorte que l'élasticité de ce support lui permet de céder un peu, au moment du choc du marteau, et la ramène ensuite dans la position qu'elle occupait avant le choc.

En second lieu, le choc de la tête du marteau contre la pièce de bois qui l'arrête quand il s'élève, ne donne lieu qu'à une faible perte de travail, en raison de la flexibilité et de l'élasticité que présente cette pièce, d'après la manière dont elle est disposée.

Il ne reste plus que le choc des cames contre la queue du marteau, qui est réellement nuisible par les ébranlements et la perte de travail qu'il détermine.

§ 137. **Bocards.** — On donne le nom de bocard à un appareil composé de plusieurs pilons, qu'on souleve, pour les laisser retomber.

Ensuite, afin de pulvériser les matières soumises à leur action, les bocards sont fréquemment employés dans le voisinage des usines métalliques, pour réduire en poudre les minerais qui contiennent des parties non métalliques ou *gangues*, ce qui permet de les débarrasser facilement de ces gangues. Les fig. 21 à 23 représentent un bocard qui sert à pulvériser le minerai de la mine de Huelgoath, en Bretagne.

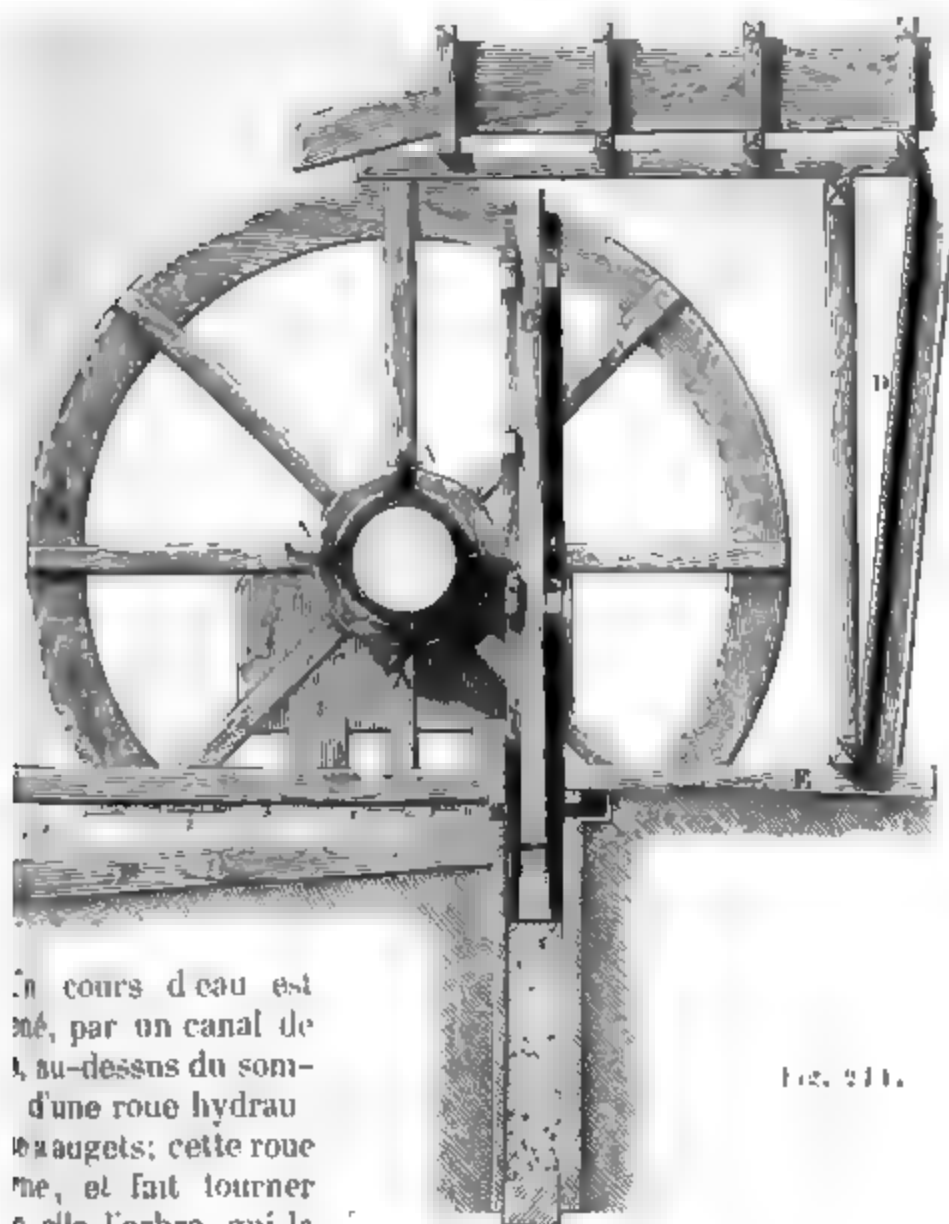


Fig. 21.

Un cours d'eau est amené, par un canal de bois, au-dessus du sommet d'une roue hydraulique; cette roue tourne, et fait tourner avec elle l'arbre qui la

porte. Cet arbre se prolonge d'un côté de la roue, et passe devant les pilons, qui sont entraînés à la suite les uns des autres, parallèlement à l'axe de l'arbre

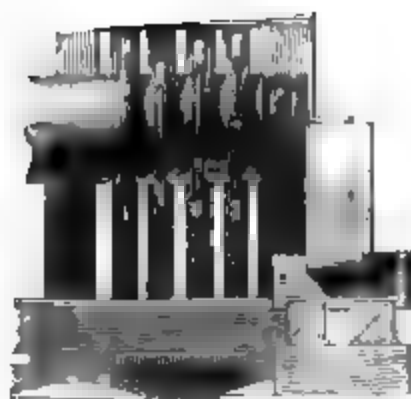


Fig. 215.

dans
guide.
Si
sur la
cet en
diffère
raient
raient
même
l'arbre
inégale
servé u
sensible

que les pilons auraient été soulevés par le brusquement nulle, au moment où les capilons pour les laisser retomber tous à la rotation de l'arbre s'accélélerait donc, sivement d'une manière très notable, et de la roue hydraulique. Pour régulariser rait adapter un volant à l'arbre des came; le marteau de M. Cavé, que nous avoi Mais on n'a pas besoin d'avoir recours à convenablement le mouvement, en donna sition autre que —

soulevé quatre fois; de sorte que l'arbre fait un quart de tour, depuis le moment où le pilon est saisi par une came, jusqu'au moment où il est saisi par la suivante. Ce quart de tour est subdivisé en quatre parties égales, ou en seizièmes de tour. Si l'on examine la batterie, à partir du moment où le premier pilon à gauche, *fig. 215*, est saisi par une came, on verra que le second pilon entrera en mouvement lorsque l'arbre aura fait $\frac{1}{16}$ de tour; le troisième pilon commencera à être soulevé après $\frac{2}{16}$ de tour; le quatrième pilon, après $\frac{3}{16}$ de tour; puis, après $\frac{1}{6}$ ou $\frac{1}{4}$ de tour, le premier pilon, qui est retombé, sera soulevé de nouveau, et ainsi de suite. Ce qui a lieu pour une batterie a lieu pour chacune des deux autres. De cette manière, la résistance que l'arbre doit vaincre se trouve répartie sur toute la durée de chaque tour, et sa valeur reste sensiblement la même d'un moment à un autre. Le mouvement de rotation de l'arbre doit donc être sensiblement uniforme.

Au-dessous de chaque batterie existe une auge, dans laquelle tombent les pilons; c'est dans cette auge qu'on met le minerai à pulvériser. Les pilons, qui sont de fonte, viennent choquer les morceaux de minerai qu'ils rencontrent en tombant, et les brisent en parcelles de plus en plus petites. Un petit courant d'eau, pris sur le canal qui fournit l'eau à la roue, est amené par le tuyau D, *fig. 214*, et par la rigole E, de là il passe dans l'auge, et en sort par une grille que montre la *fig. 215*, pour se rendre dans une autre rigole F'. Ce courant d'eau, en traversant les matières qui sont soumises à l'action des pilons, entraîne les parties déjà réduites en poussière, et les dépose plus loin, dans des bassins auxquels aboutit la rigole F.

C'est par une disposition analogue qu'on fait mouvoir les pilons de bronze qui servent à la fabrication de la poudre.

§ 158. **Sonnettes.** — Pour enfoncer des pieux dans le sol, il faut exercer sur leur tête une très forte pression, afin de vaincre les résistances qui s'opposent à leur enfoncement. Il serait difficile de produire cette pression, en chargeant la tête du pieu d'une quantité suffisante de corps pesants: aussi a-t-on recours à des choes, qui permettent d'exercer la pression dont on a besoin, à l'aide d'une masse beaucoup moins grande. Quand il s'agit de pieux de petite dimension, on frappe simplement sur leur tête avec de forts marteaux qu'on manœuvre à la main. Mais cela ne serait plus suffisant pour les pieux très longs et très gros qu'on a besoin d'enfoncer dans les grands travaux hydrauliques, tels que la construction des ponts: on est obligé, dans ce cas, d'employer des machines nommées *sonnettes*, à l'aide desquelles on peut faire tomber un corps très pesant sur la tête du pieu, et produire par conséquent un choc dont l'in-

222 APPLICATION A L'ÉTUDE DE QUELQUES MACHINES

tensité soit en rapport avec la grandeur de la résistance à vaincre.

La sonnette la plus simple est celle qui est désignée sous le nom de *sonnette à tirande*, et que représente la *fig. 216*. Une ma-



chambre A, nommée *monton*, est attachée à l'extrémité d'une corde. Cette corde s'élève, passe dans la gorge d'une poulie B, redescend ensuite, et se termine par plusieurs cordons. Des ouvriers tirent ensemble ces différents cordons, et font ainsi monter le v

ont élevé autant que cela leur est possible, ils le laissent sans abandonner pour cela les cordons qu'ils tiennent.

est dirigé, dans son mouvement ascendant ou descendant, par deux pièces de bois verticales C, C, entre lesquelles il est se mouvoir. Ces deux montants présentent chacun une rainure qui existe dans toute leur longueur, et dans laquelle sont les oreilles qui sont corps avec le mouton. De cette manière le mouton retombe, il vient toujours frapper d'aplomb sur le pieu D, si celui-ci a été convenablement installé entre les deux montants C, C.

Le pieu est ordinairement armée d'une frette de fer, afin qu'il ne se fende sous l'action des chocs successifs.

La sonnette présente des inconvénients, en ce que, si les ouvriers ne cessent pas en même temps de tirer les cordons qu'ils tiennent, ceux qui tirent les derniers peuvent être enlevés avec le mouton : il pourrait en résulter de graves accidents. Pour agir tous exactement de la même manière, les ouvriers qui tirent une sonnette à tiraude ont-ils l'habitude de chanter et de régler leurs mouvements sur leur chant. D'un autre côté, la sonnette à tiraude ne permet pas d'élever le mouton bien haut : pour exercer un choc très violent, il faut employer un levier d'un poids considérable. C'est pour obvier à ces divers inconvénients qu'on a imaginé la *sonnette à déclie*.

La sonnette à déclie a une disposition analogue à celle de la sonnette à tiraude. Mais au lieu que la corde se divise en plusieurs cordons qui aboutissent entre les mains d'autant d'ouvriers, elle se fait enrouler sur un treuil à engrenages, *fig. 217*. Deux manivelles A, A, servent à faire tourner un axe B : cet axe porte un pignon qui engrène avec une roue fixée au treuil. En faisant tourner les manivelles, on peut faire monter le mouton aussi haut qu'on veut sur la charpente de la sonnette. Pour le laisser retomber, on fait glisser l'axe B dans le sens de sa longueur, de manière que le pignon se place à côté de la roue dentée, et n'engrène plus avec elle : alors le mouton, n'étant plus retenu, tombera en frappant la corde, et faisant tourner le treuil et la roue en sens inverse du sens dans lequel on les avait fait tourner précédemment. Pour produire ce déplacement longitudinal de l'axe B, qui supprime la communication du pignon avec la roue, on agit sur un levier E, qui peut tourner horizontalement autour du point D. Ce levier est terminé, en E, par une fourchette qui embrasse l'arbre B, entre deux renflements que cet arbre présente d'un côté et de l'autre. En faisant mouvoir l'extrémité C du levier, horizon-



Fig. 217.

ans un certain sens, l'axe B se transporte en sens contraire pour cela de tourner, si les ouvriers continuent à manivelles. Une cheville qu'on place dans le voisinage, l'empêche de se déplacer pendant tout le temps et doit engrener avec la roue.

de la chute du mouton, produite de cette manière, pte la corde, et détériorerait le treuil, surtout si une forte masse : aussi adopte-t-on une disposition particulière pour objet de laisser tomber le mouton seul, et de vite plus lentement la corde enroulée sur le treuil. Pour propose le mouton de deux parties. La première partie F, ai forme la tête du mouton, et qui est directement al-

orde, contient à son intérieur ui vient saisir un anneau fixé mouton G. Les deux branches y pince peuvent tourner cha- d'un point O; lorsque les ex- se rapprochent, les autres ex- s'écartent et ne tiennent plus eux ressorts I s'opposent d'au- tant plus à ce rapprochement tés H. Voici maintenant com- la manœuvre de la sonnette

du corps du mouton étant s la pince, on fait tourner les et le mouton s'élève. Au mo- s s'approche de la partie supé- charpente, les extrémités H de nement s'engager dans une ou- fig. 218, qui se rétrécit de plus mouton continuant à monter, t obligée de se resserrer dans faisant fléchir les ressorts I : vers le bas, abandonne l'an- corps du mouton tombe seul, qu'on agit sur le levier CDE,

rimier la communication des manivelles avec le treuil, et mouton tombe à son tour, en entraînant la corde. Au la tête du mouton vient choquer le mouton lui-même, la re, en raison de la forme qu'elle présente à sa partie infé- *meu se trouve de nouveau saisi*, et, en continuant à faire manivelles, on peut donner un nouveau coup de mouton

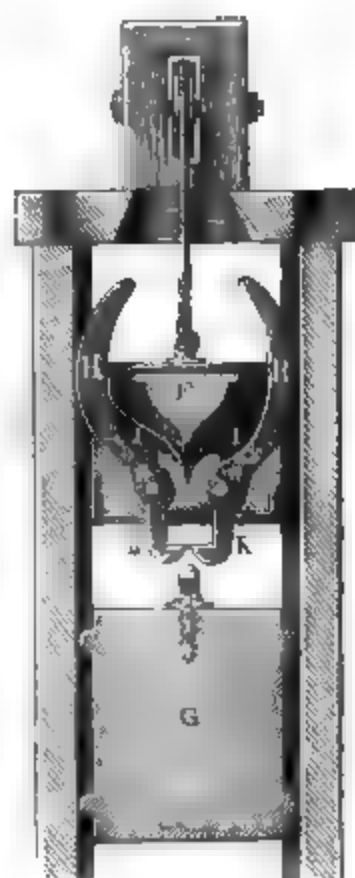


FIG. 218.

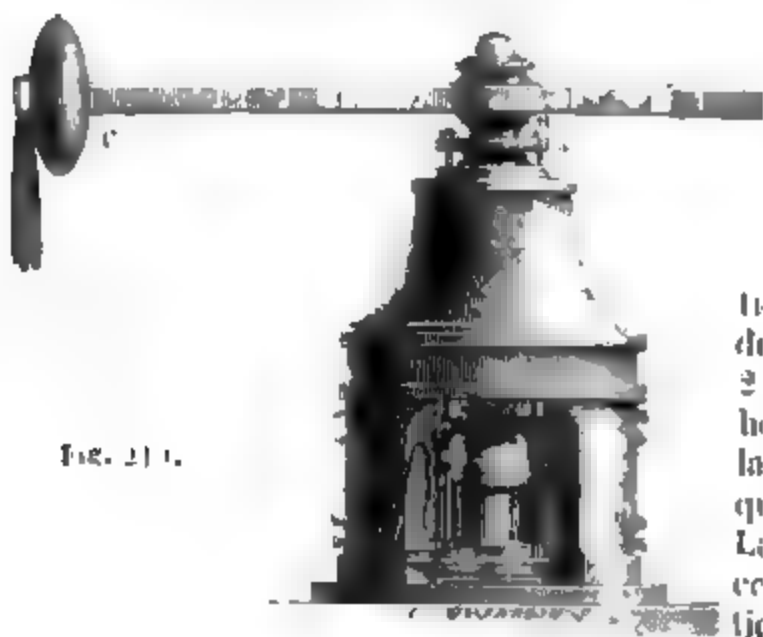
226 APPLICATION A L'ÉTUDE DE QUELQUES

§ 160. Machines qui servent à frapper les

Pour fabriquer les pièces de monnaie, on commence par un alliage ayant la composition voulue ; cet alliage écoule dans des lingotières, pour en faire des barres. Les barres sont laminées, jusqu'à ce que leur épaisseur soit diminuée ; ensuite, à l'aide d'emporte-pièce, on les coupe en rondelles de la dimension convenable ; et enfin, après les avoir ainsi obtenues, et que l'on nomme des flançons, on leur donne le poids que doivent avoir les pièces de monnaie, par une très forte pression, entre des morceaux d'acier qui présentent une gravure en creux, afin de leur faire prendre le relief qu'on voit sur toute leur surface. Ce sont les machines à frapper les monnaies que nous allons décrire.

Il n'y a pas bien longtemps qu'on employait encore le balancier monétaire inventé par M. de la Harpe, et dans lequel les flans recevaient leur relief à la fois. Depuis quelques années ce balancier a été remplacé par le balancier monétaire de M. Thomel, dans laquelle les flans sont frappés séparément, et on ne l'a plus conservé que pour frapper les médailles. Nous allons faire connaître l'une et l'autre de ces machines, en commençant par la première.

Le balancier monétaire est représenté dans son ensemble par la fig. 219. La fig. 220 reproduit, à une plus grande échelle, la partie supérieure de cette machine, qui est la partie la plus importante.



AA, formant cerrou à sa partie supérieure ; d'une visse cet cerrou ; et d'un levier CC, fixé horizon-

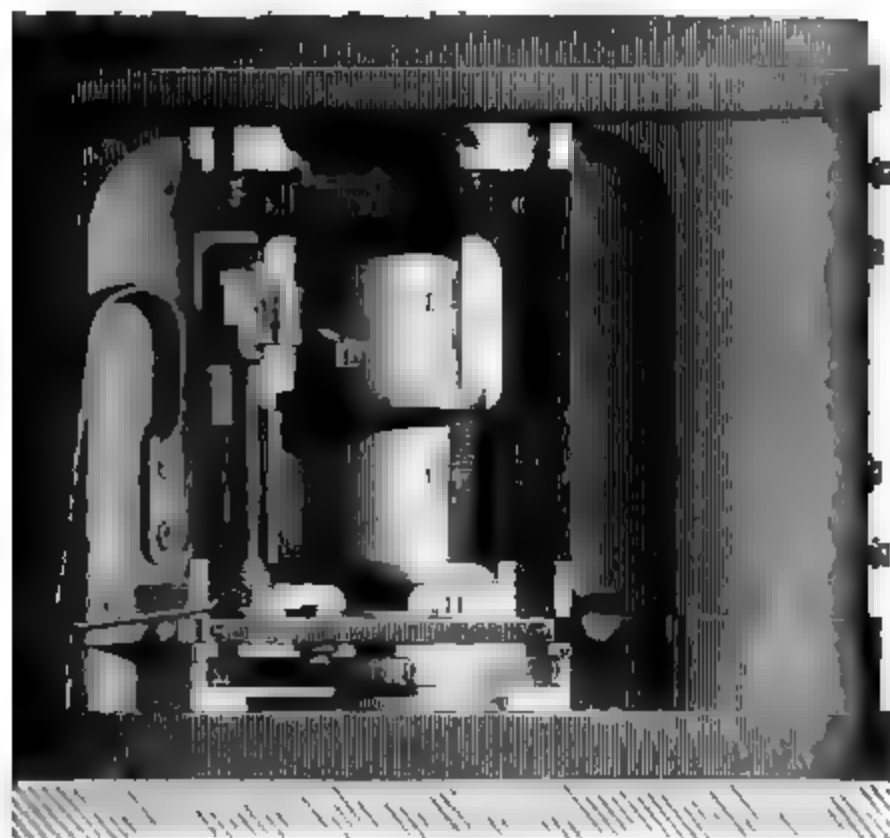


Fig. 220.

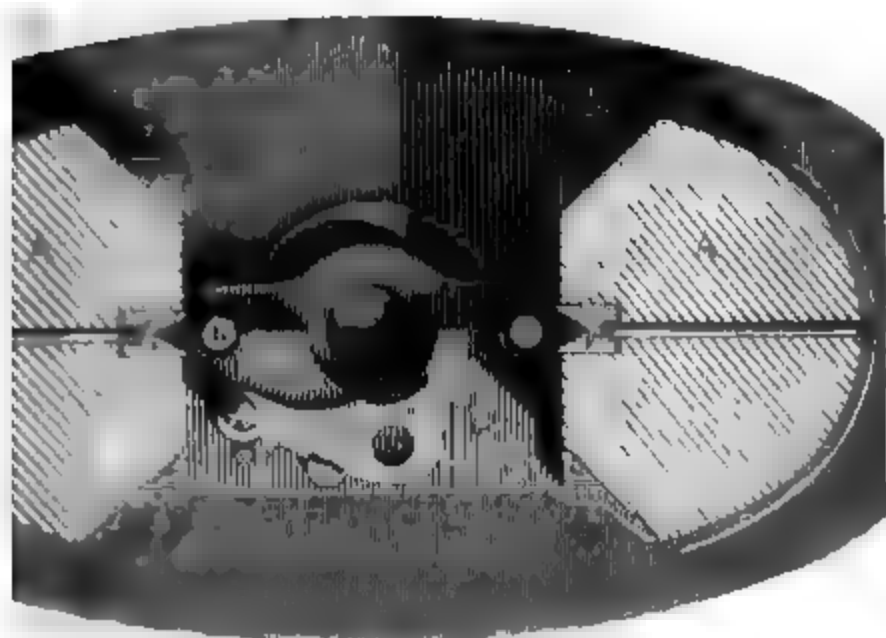


Fig. 221.

a, a la tête de la vis Co levier se termine a ses deux

extrémités par deux masses lenticulaires de bronze, attachées des lanières de cuir, qui servent à le mettre en mouvement. Lorsqu'on agit sur le levier, à l'aide de ces lanières, on le fait tourner dans un sens convenable, la vis descend, le mouvement se produit et s'entretient, l'extrémité inférieure de la vis ne rencontre pas un obstacle qui s'oppose à ce qu'elle descende davantage. Mais, aussitôt qu'un obstacle se présente, la vis et le levier sont obligés de s'arrêter brusquement, et il en résulte un choc, qui donne lieu à une grande pression de l'extrémité inférieure de la vis sur l'obstacle.

C'est pour augmenter la violence du choc qu'on ajoute au levier CC. par deux masses de bronze, voici comment on doit en rendre compte de l'effet qui en résulte. Si l'une de ces masses est animée de la vitesse qu'elle possède lorsque des horloges font le levier en mouvement à l'aide des lanières, venant à rencontrer directement un obstacle qui s'oppose à ce que son mouvement continue, elle produirait un choc, dont l'intensité serait proportionnelle à la grandeur de cette masse, et aussi à la vitesse qu'elle possédait avant le choc. Si maintenant on considère la vis qui agit par l'intermédiaire du levier et qui produit un choc, on reconnaîtra aisément, d'après le § 72, que la grandeur du choc auquel elle donnera lieu sera à la grandeur du choc qu'elle produirait directement, dans le rapport même du chemin qu'elle fait court pendant que la vis fait un tour, au pas de cette vis. Par là que l'addition de masses un peu grandes, aux deux extrémités du levier CC., doit augmenter d'une manière considérable la violence du choc que la vis et le levier auraient exercé sans ces masses.

Les morceaux d'acier trempé, qui portent la gravure des deux faces de la pièce, se nomment les *coins*. L'un est placé à la partie inférieure de la vis, et l'autre est placé au-dessus. Le flan se pose sur le coin inférieur, et, au moment où il est très fortement serré entre les deux coins, ce qui lui fait tendre à pénétrer dans toutes les cavités que présente la vis. En même temps le flan est entouré par une espèce de *virole* gravée sur tout son contour intérieur, et destinée à porter les lettres qui font saillie tout autour de la pièce de vis.

Le coin supérieur, mobile avec la vis, ne doit pas être fixe; il doit seulement descendre. Pour y arriver, on a placé à la partie inférieure de la vis une rainure circulaire, en forme de *poulie*, qui est embrassée par un collier D, fig. 2. Ce collier est fixé à une pièce EE, qu'on nomme la *boute coulante*.

une de part et d'autre par deux biseaux pénétrant dans deux lisses F, F, *fig. 221*, dans lesquelles elle peut glisser verticalement. Lorsque la vis est mise en mouvement, elle tourne dans le lier D : celui-ci, qui ne peut pas tourner, ne fait que monter ou descendre, en entraînant la boîte coulante, suivant qu'on fait mouvoir la vis dans un sens ou dans l'autre. C'est à la partie inférieure de la boîte coulante qu'est fixé le coin supérieur.

Le coin inférieur est simplement posé sur une pièce mobile, ou rotule, qui joue un rôle important. Cette rotule, dont le dessous est convexe, remplit exactement la concavité de même forme d'une grosse masse d'acier, qui occupe le milieu de la partie inférieure du massif AA. Au moment du choc, la rotule se place dans la cavité où la contient, de manière à rendre la face gravée du coin inférieur parallèle à celle du coin supérieur, et à égaliser ainsi les pressions qui s'exercent dans les diverses parties de la surface du flan.

Si la virole qui sert à former les lettres en saillie du contour de la pièce était faite d'un seul morceau d'acier, la pièce ne pourrait en sortir, après avoir été frappée : elle y serait maintenue par les lettres mêmes. Aussi emploie-t-on une virole brisée, qui est formée de trois morceaux de même dimension, et réunis par juxtaposition. Le contour extérieur de ces trois parties de la virole brisée est conique, et elles sont placées à l'intérieur d'un tronc de cône creux dont la grande base est tournée vers le haut. Des ressorts qui soulèvent ces trois pièces, pour les porter dans la partie large de la cavité conique, leur permettent de s'écarter et d'abandonner la pièce qu'elles embrassent. Au moment où un nouveau flan est frappé, la virole brisée est repoussée vers le fond de la cavité conique, ce qui oblige ses trois parties à se rapprocher les unes des autres, et fait disparaître toute solution de continuité entre elles.

La machine est disposée de manière à placer elle-même le flan dans la position qu'il doit occuper pour être frappé, et à enlever la pièce aussitôt qu'elle est frappée. Ces deux opérations s'effectuent au moment où la vis B remonte. Au niveau de la face supérieure de la virole brisée, existe une table G, formée de deux parties : on a supposé, dans la *fig. 221*, que la partie postérieure de cette table est enlevée, afin de laisser voir ce qui est au-dessous. Sur cette table se meut une pièce H, qui porte le nom de *main-poseur*, et qui est destinée à la fois à chasser la pièce qui vient d'être frappée, à l'aide de l'échancrure m, et à poser au milieu de la virole un flan qu'on a introduit d'avance dans le trou n. Pour que la pièce frappée puisse être chassée par l'échancrure m de la main-poseur, il faut que cette pièce soit élevée jusqu'au-dessus de la virole brisée. A cet

230 APPLICATION A L'ETUDE DE QUELQUES MACHINES
 effet, le coin inférieur peut être soulevé par une plaque
 sont fixées deux tiges R. R. qui traversent librement
 dans toute sa hauteur, et qui aboutissent à un collier S
 Quand la vis B monte, les extrémités des filets pousse
 de bas en haut; mais bientôt ces filets pénètrent dans
 crures pratiquées dans le collier, qui reste stationnaire
 le temps que la vis continue à monter, et maintient ain
 Q à une hauteur convenable, pour que la face gravée
 férieure soit au niveau du dessus de la table G.

Le mouvement est donné à la main-poseur par une c
 à la vis B, qui, pendant le mouvement ascendant de cet
 saisir une palette M: cette palette, appuyant sur une
 porte l'arbre vertical N, le fait tourner, et avec lui la m
 qui est attachée à sa partie inférieure. La vis continue
 la came L finit par ne plus toucher la palette M que pa
 extérieure, qui est cylindrique. la main-poseur ne t
 mais alors une saillie de la vis B soulève, en montant
 la main-poseur: la palette M est bientôt abandonnée pa
 et la main-poseur est ramenée en arrière par le croc
 tire le ressort P. Dans ce mouvement rétrograde, la r
 qui reste soulevée, pendant quelque temps, par la saill
 passe au-dessus du flan qu'elle a déposé au centre de
 Lorsque la vis B redescend pour frapper le flan, la ca
 contre la palette M, qui cède sans faire tourner l'axe N
 ensuite ramenée dans sa position par un ressort: en n
 le collier SS et la plaque Q se sont abaissés, le coin i
 venu se reposer sur la rotule, et le flan, descendant a
 s'est placé à l'intérieur de la virole, dans la positio
 occuper pour être frappé.

§ 164. La presse monétaire de M. Thonnellier, qui a ét
 au balancier que nous venons de décrire, n'en diffère

en haut, contre la colonne I, par l'action des deux contre-N, action que transmettent le levier M et le montant à four-L. Lorsque la manivelle G soulève le levier H, ce levier

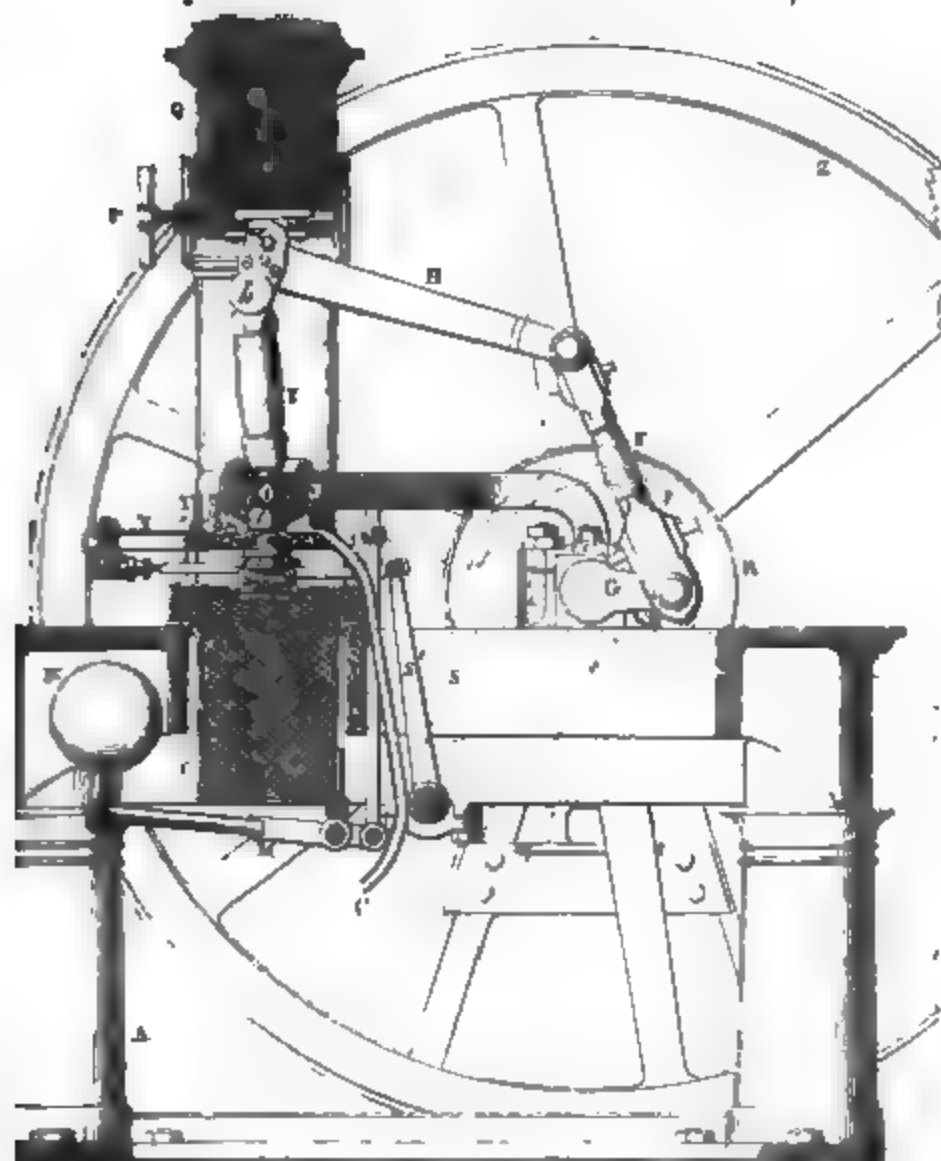


Fig. 222.

à abaisser la colonne I, ainsi que la boîte coulante; si d'ailleurs les coins sont à une distance convenablement réglée l'un de l'autre, et qu'un flan ait été introduit entre eux, ce flan éprouvera une compression extrêmement grande, qui sera suffisante pour produire le même effet que le choc dans le balancier monétaire. On se fait une idée de la grandeur de la pression exercée par la colonne en observant combien peu descend la boîte coulante, lorsque

232 APPLICATION A L'ÉTUDE DE QUELQUES MACHINES.

L'extrémité du bras de levier H s'élève d'une quantité notable (§ 72).

La distance entre les deux coins est réglée par une vis de rappel P, qui sert à enfoncer plus ou moins un coin entre le massif Q de la presse, et le tampon d'acier sur lequel se trouve le point fixe du levier H.

Quant aux autres parties du mécanisme, elles agissent à peu près de la même manière que les parties correspondantes du balancier. Voici quel en est le jeu. Un plateau R, monté sur l'arbre du volant, présente une coulisse excentrique *ii*; un bouton *j*, qui pénètre dans cette coulisse, est fixé à l'extrémité supérieure du bras de levier S; et ce bras de levier, attaché inférieurement à un axe horizontal, prend un mouvement oscillatoire, par suite de la forme de la coulisse *ii*. Ce mouvement se transmet au levier S', qui est attaché au même axe; et la tringle U, *fig. 223*, dont l'extrémité recourbée

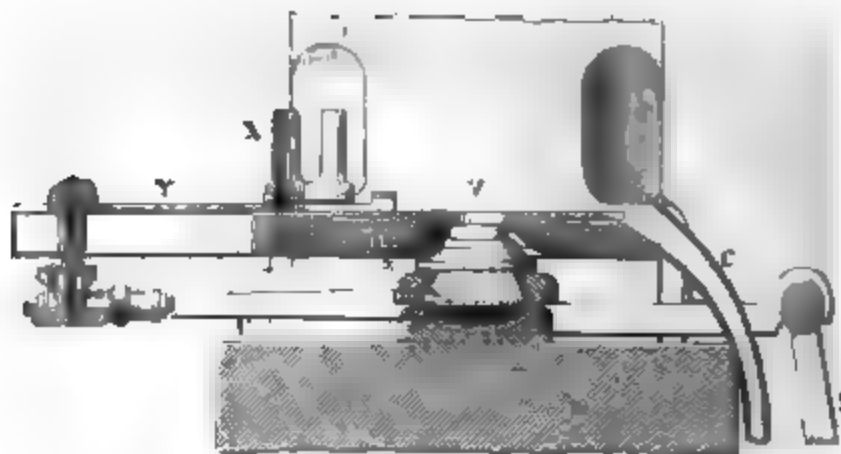


Fig. 223.

s'appuie sur le levier S', reçoit un mouvement de va-et-vient dirigé horizontalement. Dans ce mouvement de va-et-vient, lorsque la tringle U se transporte à droite, la partie inclinée, qui se trouve au milieu de sa longueur, vient soulever le coin inférieur, pour élever la pièce frappée au-dessus des bords de la virole brisée: en même temps cette tringle fait marcher, également vers la droite, la main-poseur Y, qui chasso la pièce frappée dans le conduit C, d'où elle tombe dans une corbeille, et qui dépose ensuite un flan au milieu de la virole. Ici la main-poseur Y se compose de trois parties, comme le montre la *fig. 224*; les deux pièces latérales se rapprochent de la pièce du milieu, pour saisir le flan et le poser sur le coin V; mais dès qu'il y est posé, ces deux parties latérales s'écartent, et la main-poseur se reporte vers la gauche, en abandonnant le flan. V est un globelet, dans lequel on dépose une pile de flans, que la

poseur prend un à un par-dessous, pour les porter sur le coin. Les fig. 223 et 224 montrent la disposition de la virole brisée, telle

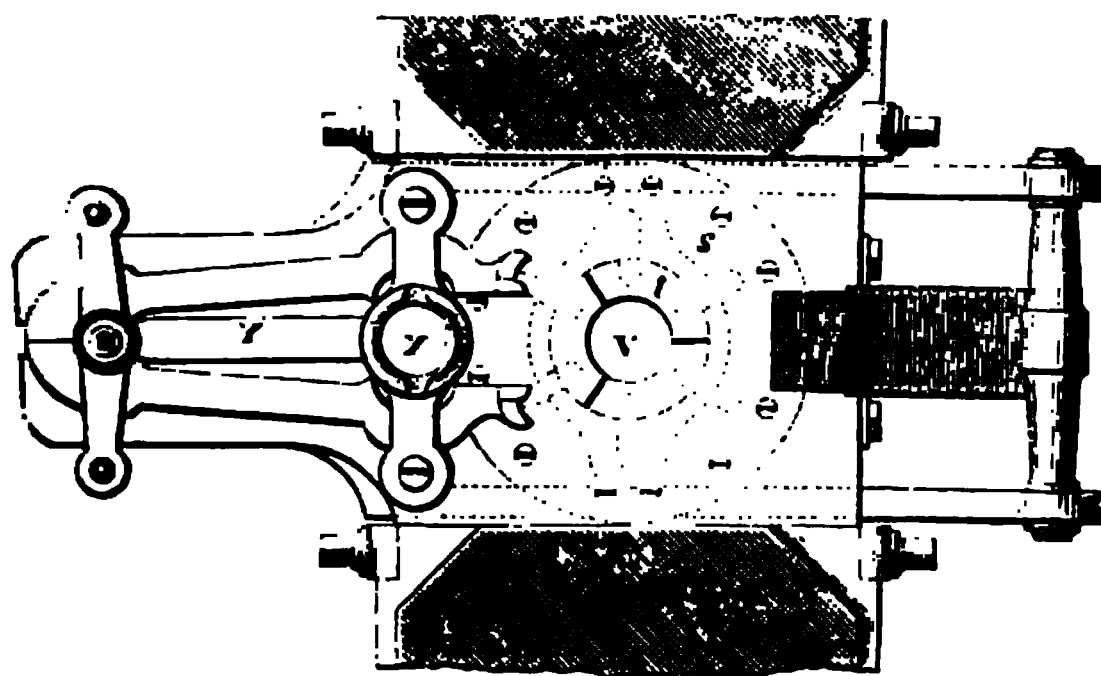


Fig. 224.

elle a été indiquée précédemment pour le balancier : *q* est le porte-virole : *s* le cercle de la virole, qui présente intérieurement une cavité conique : *t* la virole brisée en trois parties : *x* les ressorts qui servent à tenir la virole brisée ouverte et à fleur du porte-virole. Les fig. 222, 223 et 224 se rapportent à la presse monétaire, telle qu'elle a été construite par M. Thonnellier ; plusieurs modifications ont été apportées aux parties accessoires de cette machine, mais qu'elle fonctionne à l'hôtel des Monnaies de Paris : mais les parties essentielles, celles qui servent à exercer la pression nécessaire pour modeler les pièces de monnaie, n'ont été nullement modifiées.

La presse monétaire présente plusieurs avantages sur le balancier qu'elle a remplacé. D'abord elle permet d'exercer toujours la même pression pour frapper les flans, ce qui donne lieu à des résultats très réguliers : tandis que la force des hommes employés à manœuvrer le balancier présentait des irrégularités notables. D'un autre côté, si l'on oubliait de mettre un flan entre les coins du balancier, ces deux coins choquaient l'un contre l'autre et se brisaient : tandis que dans la presse, les deux coins ne viennent jamais en contact, lors même qu'il n'y aurait pas de flan entre eux. Un troisième avantage consiste dans la rapidité de l'opération : une presse monétaire frappe environ 60 pièces à la minute, et peut ainsi fonctionner pendant longtemps sans avoir besoin de s'arrêter : tandis que le balancier frappait beaucoup moins de pièces par minute, et

234 APPLICATION A L'ÉTUDE DE QUELQUES M

les ouvriers avaient besoin de se reposer de temps e
le gobelet X, dans lequel on met une pile de flans, d
d'un ouvrier exclusivement chargé de mettre les fl
de la main-poseur.

Les balanciers sont maintenant exclusivement
frapper les médailles.

§ 462. **Horlogerie.**—Nous savons que, dans
uniforme, les chemins parcourus sont proportionnels
ployés à les parcourir. Un pareil mouvement est é

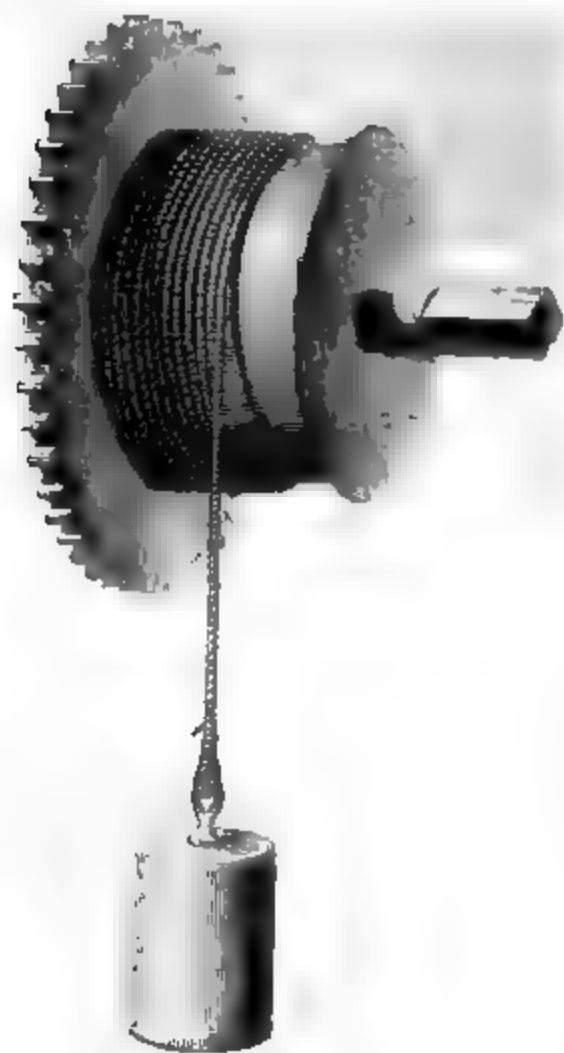


Fig. 225.

pro à la mes
puisque il ramè
à celle de l'e
par le corps qu
dans la consti
chines destiné
temps, a-t-on
produire un r
forme. Mais,
sant, on rec
extrêmement
ver. Pour qu'
meuve toujou
vitesse, il fa
santre qui lui
fasse constam
aux résistanc
vainero. Si la
serve toujours
deur, la puiss
constamment
intensité; si
viennent à vari
doit varier dan
et d'une quant
pour que l'équi
tes ces forces n
blé. Or, on cor
grand nombre

de toute espèce qui se développent dans le mouvem
chine, qu'on doit rencontrer de grandes difficultés,
la puissance de telle sorte qu'elle fasse équilibre à
à toutes ces résistances et on le concevra d'o

où les résistances changent souvent d'un moment à manière purement accidentelle, suivant les variations de température, d'humidité, etc. Nous allons voir par quels moyens on ne se contente pas de lever ces difficultés, mais à les éluder en les évitant, pour atteindre le même but, dans la construction et des montres.

Les moteurs employés pour faire monvoir les mécanismes mesurer le temps sont de deux espèces différentes : les poids et des ressorts.

Pour agir un poids comme moteur d'une horloge, on le suspend à l'extrémité d'une corde qui est attachée sur la surface d'un cy-

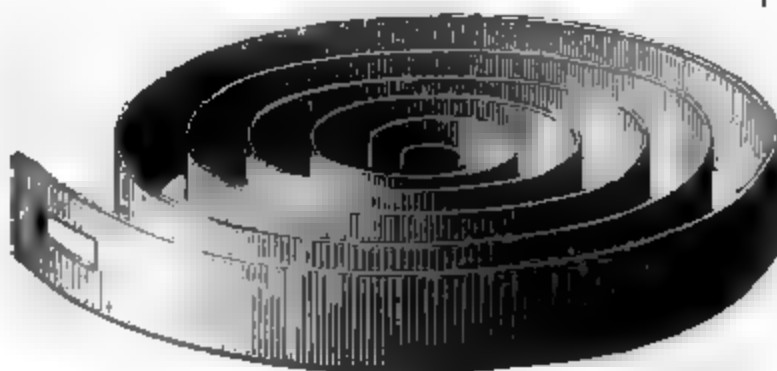


Fig. 226.

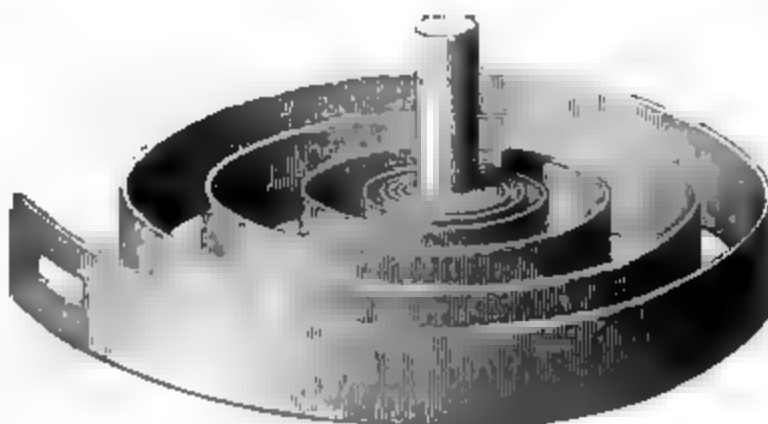


Fig. 227.

Les mécanismes d'horlogerie, sont des lames d'acier très longues, qui ont été travaillées de manière à s'enrouler en spirales, comme le montre la fig. 226.

On fait que l'extrémité extérieure du ressort soit attachée à fixe, et que l'extrémité intérieure soit liée à un axe de tourner sur lui-même : lorsqu'on fera tourner cet

236 APPLICATION A L'ÉTUDE DE QUELQUES MACH

axe dans un sens convenable, il entraînera avec lui intérieure du ressort, les spires se serreront de plus son contour, et le ressort prendra la forme indiquée *fig. 227*. Si l'on abandonne ensuite l'axe à lui-même qui tend à reprendre sa forme primitive, lui imprimant un mouvement de rotation : c'est ce mouvement que l'on transmet d'horlogerie, à l'aide d'engrenages. Il est l'extrémité intérieure du ressort pourrait être tout autre, si l'extrémité extérieure était attachée à une pièce capable de tourner autour de l'axe du ressort, elle communiquerait également un mouvement de rotation à cette pièce.

Si l'on compare l'action du ressort dont on vient de parler à celle d'un poids, on verra qu'il y a une différence essentielle : le poids moteur agit toujours avec la même intensité ; la force du ressort va constamment en diminuant, depuis qu'il commence à agir, jusqu'au moment où il a repris sa forme primitive. L'avantage que présente l'uniformité d'action se retrouve donc plus dans l'emploi d'un ressort, et non dans celui d'un poids. Cette uniformité d'action est essentielle à la marche du mécanisme. Pour faire disparaître l'inconvénient que présentent les ressorts, sous ce point de vue, on a imaginé de les faire agir à l'intermédiaire d'une fusée, qui a pour objet de rendre constante l'action. A cet effet on enferme le ressort dans un cylindre, *fig. 228*, qu'on nomme le *barillet* ; sur la surface de ce cylindre est fixée l'extrémité d'une chaîne articulée B, qui, après

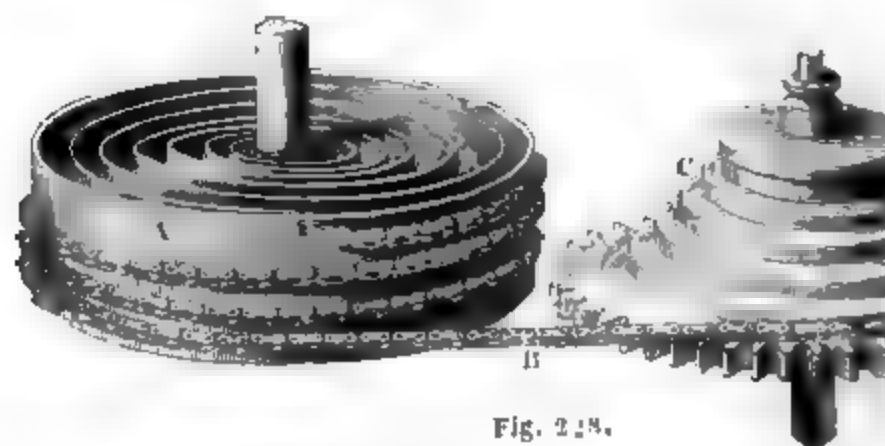


Fig. 228.

un certain nombre de tours sur cette surface, vient se fixer sur une sorte de tambour conique C, et s'y fixe par son autre extrémité. C'est ce tambour conique qui porte le nom de *fusée*. Il présente une rainure, en forme d'hélice, dans laquelle on place les tours successifs de la chaîne. Lorsque le ressort

tendu, la chaîne est enroulée sur toute la surface de la fusée, et s'en détache du côté de sa petite base, et vient se terminer sur la surface du barillet, qu'elle ne touche que dans une petite partie. Le ressort a son extrémité intérieure fixe, et son extrémité extérieure est attachée à la circonférence du barillet; en se détendant, il agit sur le barillet, et communique un mouvement de même sens, par l'intermédiaire de la chaîne. Celle-ci se déroule sur la fusée, et s'enroule sur le barillet, et le mouvement ne cesse de se transmettre jusqu'à ce que lorsqu'elle s'est entièrement déroulée sur la fusée, de laquelle elle s'en détache du côté de la grande base. On voit que, pendant ce mouvement, la tension de la chaîne qui est produite par la force du ressort va constamment en diminuant; mais aussi la tension agit sur la fusée à l'extrémité d'un bras de levier de plus en plus grand; et l'on conçoit qu'on ait déterminé la forme de ce bras de manière qu'il y ait une compensation exacte, c'est-à-dire de manière que l'action de la chaîne produise le même effet qu'une force constante appliquée à l'extrémité d'un bras de levier fixe. Le mouvement de rotation que prend la fusée, sous l'action de la chaîne, se transmet à tout le mécanisme, par l'intermédiaire de la roue D, que la fusée entraîne en tournant.

Le moteur, quel qu'il soit, fait tourner un arbre, ainsi que nous venons de le voir: une roue dentée, mobile avec cet arbre, engrène avec une autre roue dentée plus petite, ou pignon, qui est sur un second arbre parallèle au premier; ce second arbre porte à son tour une roue dentée qui engrène avec un pignon fixé sur un troisième arbre de même direction: et ainsi de suite. Si la première roue porte le premier arbre a six fois plus de dents que le pignon auquel elle engrène, le second arbre tournera six fois plus vite que le premier; si la roue du second arbre a quatre fois plus de dents que le pignon qui lui correspond, le troisième arbre tournera quatre fois plus vite que le second, et par conséquent, seize fois plus vite que le premier. En continuant de cette manière, on reconnaîtra que le mouvement de rotation du premier arbre se transforme dans des mouvements de rotation du 2^e arbre, du 3^e arbre, du 4^e arbre,.... de plus en plus rapides: et le rapport des vitesses de deux arbres consécutifs sera toujours le même que le rapport des nombres de dents de la roue et du pignon qui transmettent le mouvement de l'un à l'autre.

Après avoir fait connaître la disposition des rouages d'un orologio ou d'une montre, et le moteur qui met ces rouages en mouvement, il ne nous reste plus qu'à montrer comment on règle le mouvement, de manière à faire mouvoir uniformément.

238 APPLICATION A L'ÉTUDE DE QUELQUES MACHINES

sur un cadran, une ou plusieurs aiguilles destinées à indiquer le temps.

Nous avons dit que, pour rendre le mouvement uniforme, il faut établir un équilibre permanent entre la puissance et les résistances. On y parvient en adaptant au dernier mécanisme, à celui dont la vitesse est la plus grande, de quoi viennent choquer l'air pendant leur mouvement. La

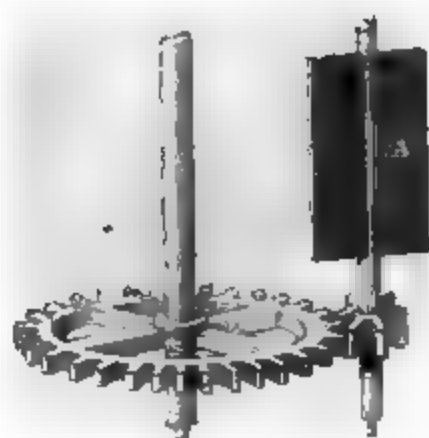


Fig. 329.

indique la disposition qu'elles ont habituellement à ces points. Elles sont au nombre de deux, et sont rectement opposées l'une à l'autre, et formées simplement d'une lame mince rectangulaire traversée au milieu de son axe par l'axe avec lequel elle tourne. La résistance qu'elles opposent varie proportionnellement au carré de leur longueur (§ 129). Il en résulte que,

lorsque le mouvement commence à s'accroître, la résistance qu'

elles opposent est très faible : la force du moteur est trop grande, et par suite la vitesse de tout le mécanisme augmente. L'accélération du mouvement détermine un accroissement de la résistance éprouvée par les palettes, et la machine finit bientôt par atteindre une vitesse telle, que la puissance fait équilibre aux résistances : dès lors le mouvement ne se modifie plus ; il reste uniforme tant que la puissance conserve la même intensité.

La nature de la résistance employée ici, pour arriver à un mouvement uniforme, présente un avantage important, qui est que sa grandeur dépend de la vitesse du mouvement. Si, par une cause quelconque, la vitesse était trop grande, les résistances l'emporteraient sur la puissance, et le mouvement se ralentirait ; au contraire, si la vitesse était trop faible, la puissance l'emporterait sur les résistances, et le mouvement s'accroîtrait. Ainsi l'emploi de la résistance de l'air, pour régulariser le mouvement d'un mécanisme d'horlogerie, ne permet pas seulement d'obtenir un mouvement uniforme, mais encore elle fait que le mouvement ne peut avoir lieu qu'avec une vitesse déterminée. Ce serait pas de même, si les résistances et la puissance étaient indépendantes de la vitesse du mouvement : l'équilibre entre ces forces ferait que le mouvement de la machine serait

nerait en aucune manière la vitesse de ce mouvement indifféremment être lent ou rapide.

Il vient d'être dit, la vitesse déterminée que prend l'horlogerie, dont le mouvement est régularisé par la résistance, dépend de la grandeur de la puissance ; puisque la vitesse devient uniforme que lorsque la résistance opposée par les palettes, jointe aux autres résistances passives, vient équilibrer à cette puissance. Pour que le mouvement continue pendant un certain temps avec une vitesse constante, il faut donc que la puissance agisse pendant tout ce temps à la même intensité. C'est ce qui aura lieu, si l'on se sert d'un moteur ; mais si l'on emploie un ressort, il sera nécessaire de faire agir par l'intermédiaire d'une fusée.

Le moyen qui vient d'être indiqué, pour régulariser le mouvement, est très excellent, il ne fournit cependant pas un mouvement parfaitement régulier pour pouvoir servir à la mesure du temps.

Les palettes, qui rencontrent en tournant, ne sont soumises à elles dans des conditions identiquement égales, à cause du courant d'air qui existe dans l'air environnant, et de la résistance dont elles sont retardées dans leur mouvement.

Le moindre changement qui arrive dans la grandeur de la puissance, et dans les frottements des diverses pièces du mouvement, trouble l'équilibre, et la vitesse varie de plus en plus, en faisant varier en conséquence la résistance opposée par les palettes de la part de l'air. Aussi n'emploie-t-on de ce mouvement que pour des usages pour lesquels on n'a pas besoin d'une précision aussi parfaite que pour la mesure du temps. On s'en sert pour faire tourner des tournebroches, pour faire mouvoir des pompes dans les machines, pour faire tourner les figures de cire qui sont dans les boutiques des coiffeurs, etc. On s'en sert encore pour produire un mouvement uniforme de courte durée dans l'appareil de M. Morin, destiné à l'étude des mouvements des corps (§ 90). C'est aussi un mécanisme de cette espèce employé dans les horloges, pour la partie de la machine qui sonne l'heure. Dans les anciens tournebroches, on employait un poids comme moteur, et la vitesse restait toujours la même. Mais dans la plupart des cas qui viennent d'être indiqués, le moteur est un ressort qui agit directement sur le mouvement, tout en étant régulier à un moment quelconque, mais qui agit peu à peu, jusqu'à ce qu'il s'arrête tout à fait. On peut donc produire, par le moyen qui vient d'être

indique, ni par aucun autre, un mouvement assez uniforme pour servir à la mesure du temps, on est obligé de se contenter d'un mouvement périodiquement uniforme, dont la réalisation, bien que présentant aussi de grandes difficultés, peut cependant être obtenue d'une manière plus complète. A cet effet, on emploie une pièce particulière, qui oscille régulièrement, et qui, à chaque oscillation, arrête entièrement le mouvement des rouages. De cette manière le mouvement est intermittent, et les aiguilles qui servent à marquer le temps sur un cadran, au lieu de tourner avec continuité, marchent que par saccades; mais la quantité dont elles se déplacent à chaque fois est ordinairement si faible, que l'œil ne peut s'en apercevoir, et que leur mouvement présente, en définitive, les apparences d'un mouvement continu extrêmement lent. Ce n'est que lorsqu'une aiguille marche assez rapidement sur un cadran, comme les aiguilles qui marquent les secondes, que ce mouvement discontinu devient sensible.

La pièce oscillante, dont nous venons de parler, et dont les oscillations doivent servir à arrêter périodiquement le mouvement des rouages, porte le nom de *régulateur*. Les pièces qui sont destinées à établir une liaison entre les rouages et le régulateur, par l'intermédiaire desquelles celui-ci arrête à chaque instant le mouvement produit par le moteur, constituent ce que l'on nomme l'*échappement*.

§ 167. Le premier régulateur qui ait été employé pour les horloges et les montres consiste en une roue métallique, massive à sa circonférence, et mobile autour d'un axe sur lequel elle est fixée à son centre. Cette roue, espèce de petit volant, qu'on désigne sous le nom de *balancier*, ne prend pas d'elle-même un mouvement d'oscillation autour de son axe, après qu'on lui a donné une impulsion initiale; mais ses oscillations sont produites par l'action du moteur lui-même, action qui se transmet par l'intermédiaire des rouages de l'échappement. C'est ce que fera bien comprendre la *fig. 230*, qui est destinée à montrer en même temps la disposition générale d'une montre: elle a été construite en écartant les roues les unes des autres, dans le sens de la hauteur, et en plaçant leurs axes sur le même plan, afin de faire voir d'une manière plus nette tous les détails de cette disposition.

Le ressort A, dont l'extrémité extérieure est fixe, tend à faire tourner l'axe auquel est attachée son extrémité intérieure. Cet axe porte une roue à rochet B, qui agit sur la roue dentée C, par l'intermédiaire du doigt *a*. La roue C fait tourner le pignon D, et par suite la roue E; celle-ci fait tourner le pignon F, et la roue G; la roue G communique son mouvement au pignon H, et l'axe de ce pignon fait tourner

intermédiaire de la roue K et du pignon L, qui font des d'angle. En avant de la roue M, qui porte des dents articulière, passe l'axe du régulateur N : cet axe est

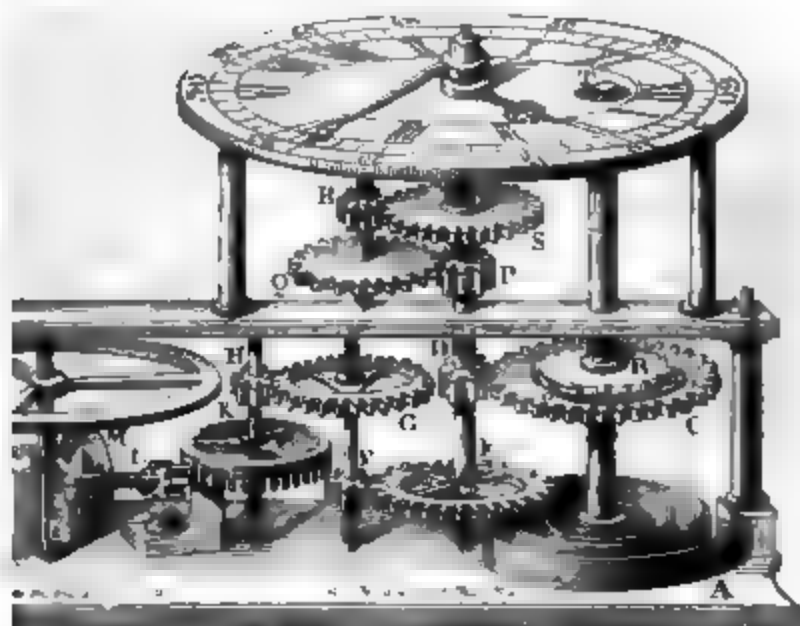


Fig. 230.

x palettes *i*, *i'*, dirigées à angle droit l'une sur l'autre, regard de la partie supérieure et de la partie inférieure, de manière à pouvoir être rencontrées par les dents *j*, qui porte le nom de *roue de rencontre*. Lorsque la ses dents viennent alternativement choquer les deux La palette *i* reçoit une impulsion qui la fait mouvoir l'arrière. Mais bientôt l'autre palette *i'* vient se mettre d'une dent de la roue M : elle en reçoit une impulsion on avant. La palette *i* se trouve alors de nouveau place à être rencontrée par les dents de cette roue : elle s'en arrière, et ainsi de suite.

ment est ici formé de la roue de rencontre M, et des *i*, *i'* : on le nomme *échappement à recul*, parce que, u'une des palettes vient choquer une des dents de la acier, qui n'a pas encore perdu tout son mouvement, roue d'une certaine quantité. Le mouvement n'est ré-d'une manière imparfaite par l'emploi du balancier et nent à recul. Chaque mouvement que prend le balan-communiqué par l'action d'une dent de la roue de ren- *des palettes*, et ce mouvement s'effectue avec une

indiqué puisse être employé, il est de toute nécessité que la vitesse du moteur soit aussi constante que possible, et que les divers frottements qui se produisent pendant toute la durée du mouvement produisent une grande uniformité.

§ 168. La *fig. 230* fait voir de quelle manière les roues marchent, sur un même cadran, et avec des vitesses différentes, la aiguille des heures et l'aiguille des minutes. L'axe de la roue la plus longue, et c'est à son extrémité qu'est fixée l'aiguille des minutes. Il faut donc que le ressort moteur et le régulateur soient disposés de manière que cet axe fasse un tour entier en une heure. Sur cet axe est monté un pignon P, qui engrène avec une roue Q ; de la roue Q porte un pignon R, qui engrène avec une roue S. La dernière roue est fixée à un cylindre creux, dans lequel passe l'axe de l'aiguille des minutes, et c'est à l'extrémité de ce cylindre creux qu'est adaptée l'aiguille des heures. De cette manière les deux aiguilles se meuvent circulairement autour d'un même centre, et cependant elles ne sont pas animées du même mouvement. Le pignon P a 8 dents, et la roue Q, 24 ; l'aiguille des minutes fait donc trois tours, pendant que la roue Q en fait un. D'un autre côté, le pignon R a 8 dents, et la roue S en a 32 ; en sorte que la roue S fait quatre tours, pendant que la roue S en fait un. La roue S fait un tour pendant que l'aiguille des minutes en fait douze, et

la roue E et le pignon D, et l'autre porte le pignon P et l'aiguille minutes. L'un de ces deux axes est creux à son extrémité, et l'autre axe pénètre à frottement dans cette cavité; en sorte que l'un des axes venant à tourner par une cause quelconque, l'autre tournera en même temps, à moins qu'il n'éprouve une résistance capable de vaincre le frottement qui se développe entre eux. Lorsque la roue E tourne, elle entraîne le pignon P, et par suite les aiguilles, qui ressentent qu'une faible résistance. Mais si au contraire on veut faire tourner les aiguilles à l'heure, en faisant tourner directement l'aiguille minutes, l'axe de cette aiguille n'entraînera pas l'axe de la roue E dans son mouvement, à cause de la résistance opposée par le mécanisme, qui devrait se mouvoir en même temps que la roue E. L'aiguille des minutes ne fait tourner avec elle que les roues pignons P, Q, R, S, et l'aiguille des heures et tous les autres ajages restent en repos.

§ 169. Le ressort, qui met tout le mécanisme en mouvement. (Fig. 230), ne peut pas agir indéfiniment : lorsqu'il est détendu, il est nécessaire qu'on le tende de nouveau, pour que le mouvement continue : c'est ce qu'on appelle *remonter* l'horloge ou la montre. Pour tendre le ressort A, on adapte une clef à l'extrémité carrée T de l'axe auquel il est attaché intérieurement, et l'on fait tourner cet axe dans un sens contraire à celui dans lequel l'action du ressort le fait habituellement tourner. Si la roue C était fixée à cet axe, elle tournerait avec lui, pendant qu'on tendrait le ressort, et elle entraînerait nécessairement tout le mécanisme, y compris les aiguilles, dans le mouvement rétrograde. Pour que cela n'ait pas lieu, on fait agir l'axe du ressort moteur sur la roue C, par l'intermédiaire d'une roue à rochet B, et d'un doigt o, sur lequel appuie constamment un petit ressort de pression. De cette manière la roue C n'est entraînée par l'axe, que lorsque celui-ci cède à l'action du ressort moteur : et lorsqu'on fait tourner cet axe en sens contraire, pour remonter le ressort, on n'entraîne que la roue à rochet B, dont les dents passent successivement sous le doigt o, en faisant entendre un bruit que tout le monde connaît. Par suite de cette disposition, les roues et les aiguilles restent immobiles pendant toute la durée du remontage.

§ 170. Revenons maintenant à l'étude des régulateurs. L'emploi d'un pendule, pour régulariser le mouvement d'une horloge, a été imaginé par Huyghens, en 1657. C'est à ce régulateur qu'est due la grande précision avec laquelle les horloges bien construites marquent le temps. Quels que soient les soins qu'on mette à disposer le mécanisme, de manière que le régulateur soit soumis à des actions constantes de la part du moteur, on ne peut jamais y arriver qu'im-

244 APPLICATION A L'ÉTUDE DE QUELQUES MACHINES.

parfaitement ; il est donc très important que le régulateur soit de telle nature, que la durée de ses oscillations ne soit pas influencée par la variation de ces actions. Or c'est précisément ce qui est requis pour le pendule, dont les oscillations, pourvu qu'elles soient isochrones, ont une durée indépendante de leur amplitude. Si l'amplitude des oscillations du pendule, employé comme régulateur, se trouve augmentée, tantôt diminuée par l'effet du moteur, leur durée restera pas moins toujours à très peu près la même, et par conséquent le mouvement de l'horloge sera convenablement régularisé. C'est cependant pas une raison pour négliger de rendre l'action du

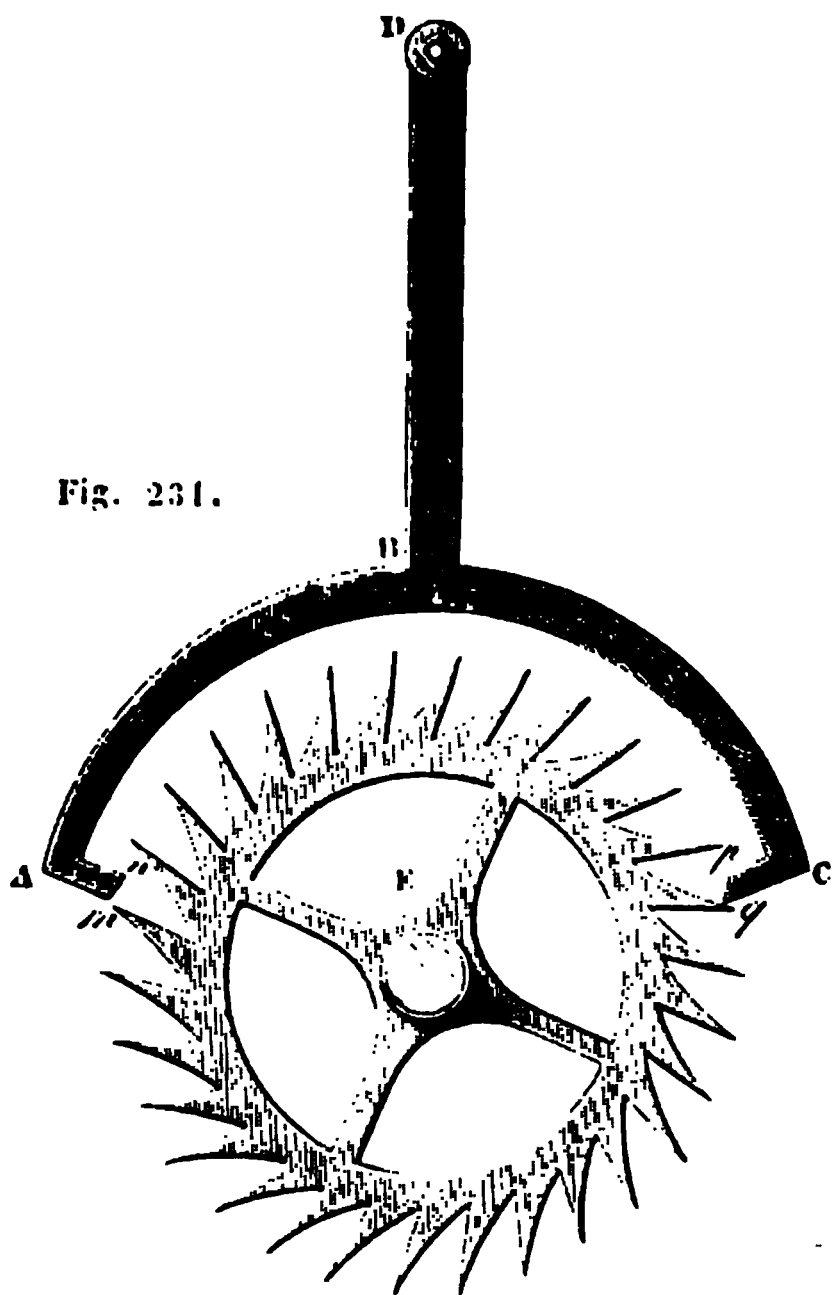
sur le régulateur uniforme que possible, lorsque l'on arrive à un très haut degré de précision dans la mesure du temps.

L'échappement employé habituellement pour faire communiquer les mouvements d'une horloge avec un pendule régulateur est l'échappement à ancre que nous allons maintenant décrire, et qui est représenté par la figure 231.

Une pièce en forme d'ancre est suspendue à son axe horizontal et peut librement tourner autour de ce point de suspension. Cette ancre reçoit du pendule un mouvement oscillatoire autour de son point de suspension. En

deux extrémités A et C se trouve une roue E, qui est fixée à l'arbre du mécanisme de l'horloge, et à laquelle le moteur donne constamment un mouvement de rotation. Les dents de cette roue viennent alternativement s'appuyer sur la face

Fig. 231.



partie A de l'ancre, et sur la face supérieure de la
es deux faces sont d'ailleurs taillées suivant des arcs
oncentriques à l'axe D ; en sorte que, pendant tout
i'une dent de la roue E est arrêtée par l'une des ex-

l'ancre, cette dent, et par suite la roue, étiement immobile. C'est le contraire de t lieu dans l'échappement à recul, où nt de la roue de rencontre se mouvait nt, pendant qu'elle était en contact avec ui l'empêchait de passer.

extrémités A et C de l'ancre présentent de la roue, deux parties *mn*, *pq*, en sens contraires, sur lesquelles les dents doivent glisser avant d'échapper. Au moment de ce glissement se produit, la dent exerce une pression qui tend à augmenter sa course, l'ancre réagit de son côté sur le pendule pour tenir son mouvement. Sans la présence de ces petits plans inclinés, l'amplitude du mouvement du pendule décroîtrait progressivement, les résistances occasionnées par l'air et la suspension du pendule, et aussi en raison de la friction qui proviennent du frottement de la roue sur les faces de l'ancre : ces résistances, au bout de peu de temps, les dents du pendule assez petites pour que les dents de la roue E n'échappent plus, et l'horloge s'arrêterait.

232 montre de quelle manière l'ancre est en communication avec le pendule. L'axe horizontal auquel elle est fixée, porte à un bout une tige F, qui se déplace par une fourchette horizontale G. La tige passe entre les branches de cette fourchette : en sorte que le pendule ne peut pas osciller, sans que l'ancre oscille en sens inverse.

échappement à recul, le moteur agissait constamment sur lui pour modifier son mouvement. Il n'en est pas de même pour l'échappement à ancre, où l'influence du moteur sur le régulateur en grande partie; cette influence n'existe plus que momentanément des dents de la roue d'échappement sur les faces du régulateur. On peut rendre presque nul le frottement qui agit sur les faces du régulateur, et dans les cas où l'ancre reçoit des dents, au moment où elles échappent.

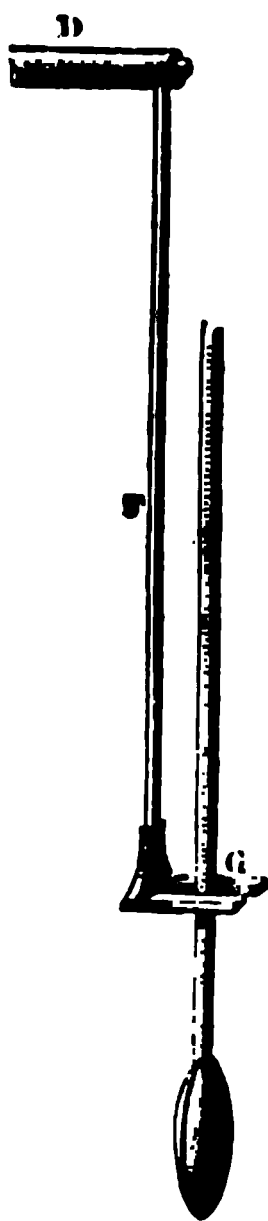


Fig. 232.

entre l'aiguille des minutes et la roue d'échappement. On ne puisse régler une horloge, c'est-à-dire l'empêcher d'aller ou trop lentement, il est nécessaire qu'on puisse modifier le pendule, afin de l'amener à effectuer ses oscillations dans un temps convenable. Pour cela on ne fixe pas la lentille du pendule à la tige; elle est simplement traversée par cette tige, et soutenue par un écrou, qui est vissé sur la tige, et qu'on peut faire monter ou descendre à volonté. Lorsque l'horloge va trop vite, cela vient de ce que les oscillations du pendule ont une trop courte durée; on les prolonge en abaissant la lentille. Si au contraire l'horloge va trop lentement, on relève la lentille. Dans les pendules de cheminée on a adopté une disposition un peu différente: la lentille est fixée à la tige, et le tout est suspendu à un fil de soie, qu'on allonge ou qu'on raccourcit, suivant que la pendule avance ou retarde.

§ 471. Les *fig. 233 et 234* montrent la disposition d'une horloge dont le mouvement est régularisé par un pendule et un poids moteur à ancre. Le poids moteur A agit à l'extrémité d'un fil qui est enroulé sur le cylindre B; il tend à faire tourner le cylindre, et par suite la roue C; cette roue C engrène avec une roue D, dont l'axe porte une deuxième roue E: le pignon F engrène avec la roue E, et sur son axe est fixée une troisième roue G; cette roue G engrène à son tour avec le pignon H, sur l'axe duquel est fixée une quatrième roue K: enfin la roue K engrène avec le pignon L, dont l'axe porte la roue d'échappement M. L'ancre NN' agit autour de l'axe O, embrasse la partie supérieure de la roue M, et se termine en une tige S qui se termine en une

ier en 60 secondes ou une minute. Le pignon *ll*, *b* de la roue *K*, se prolonge à gauche de la figure, nent engrène avec une roue *c*, fixée à un cylindre enveloppe l'axe de l'aiguille des secondes, et qui des minutes. À côté de la roue *c*, et sur le même existe une seconde roue *d*, qui engrène avec une

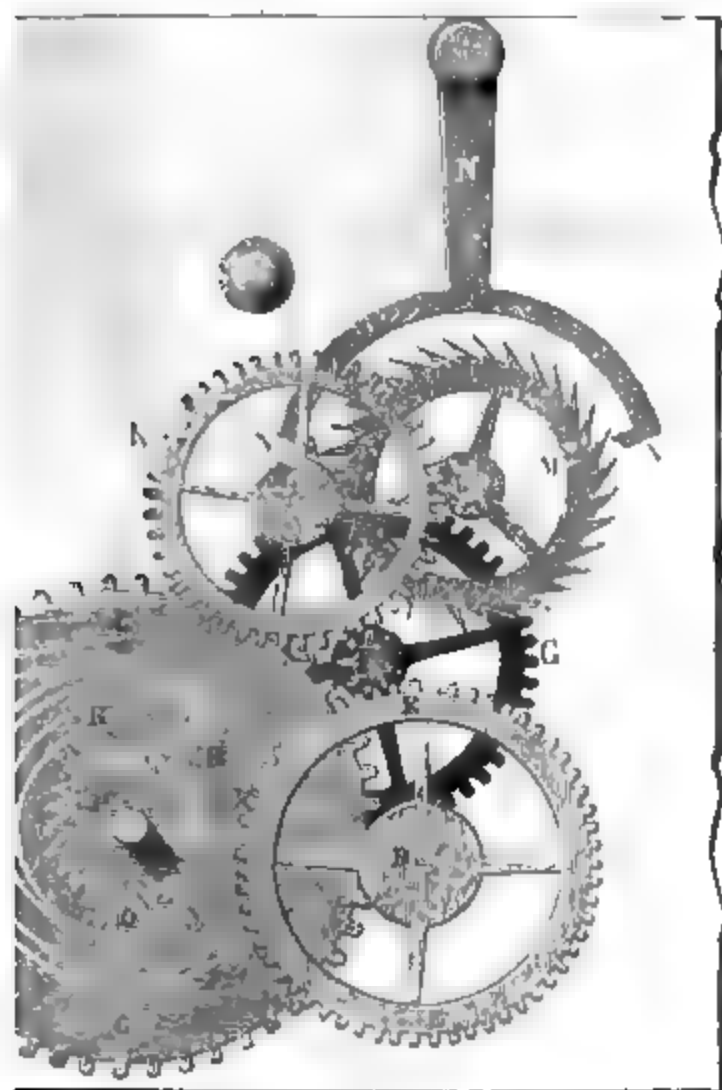


Fig. 213.

la roue *e* porte un pignon *f*, qui engrène avec la roue *g* est fixée à un second axe creux, qui enveloppe, et qui porte l'aiguille des heures. Le moteur a fait dérouler, en descendant, toute la

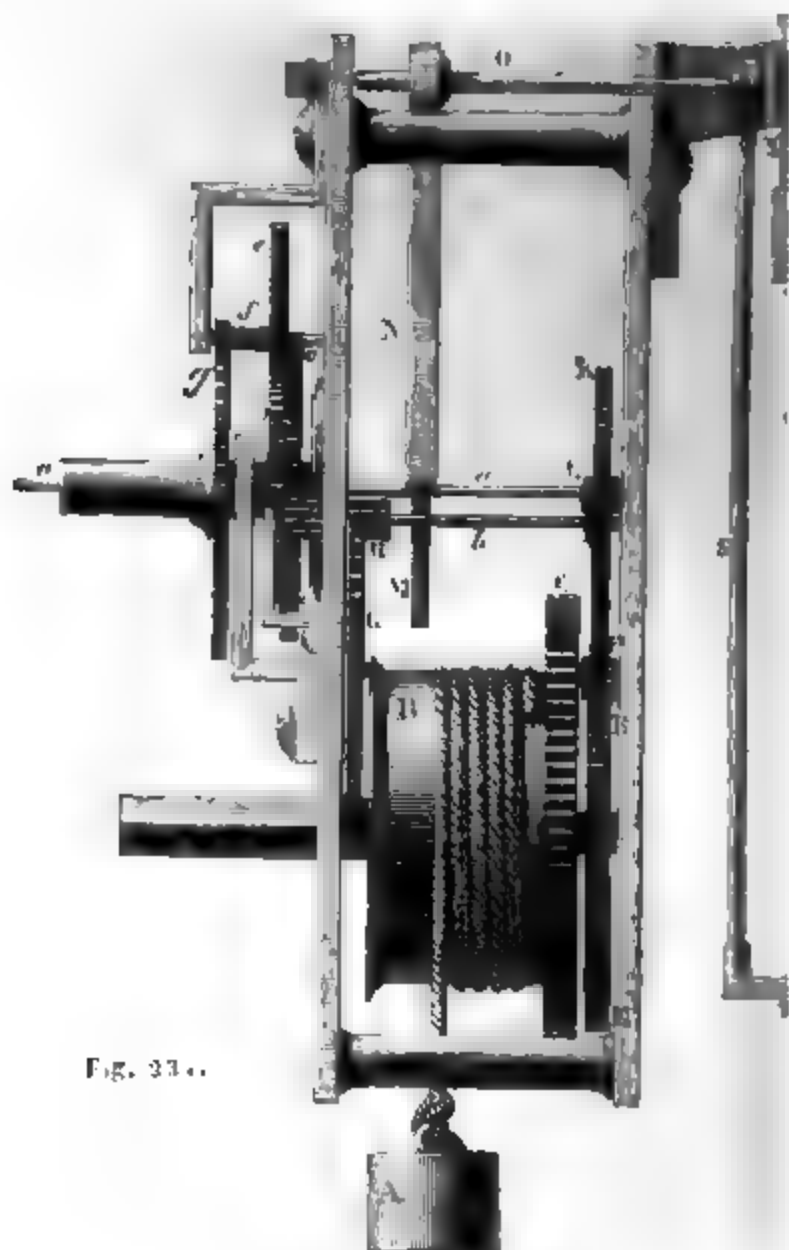


Fig. 231.

corde qui était enroulée sur le cylindre B, il ne peut plus continuer à agir, à moins qu'on n'enroule de nouveau la corde, en faisant remonter le poids. Pour cela, on fait tourner le cylindre B dans un sens convenable, à l'aide d'une clef. Tous les rouages seraient entraînés dans ce mouvement rétrograde, si l'on n'avait pas adapté au cylindre un appareil semblable à celui que nous avons déjà vu sur la fig. 230, et qui était destiné à remplir le même objet. Une roue à rochet P, fig. 233, est fixée à l'axe du cylindre B, et tourne nécessaire-

ce cylindre, dans quelque sens qu'il se meuve. Un doigt Q entre les dents de la roue P; et un ressort R maintient constamment appuyé sur la roue. Le ressort et le doigt sont à la roue dentée C. Lorsque le cylindre B tourne sous l'action du moteur A, il fait tourner la roue C, par l'intermédiaire du rochet et du doigt; mais lorsqu'on fait tourner le cylindre en sens contraire, pour remonter le poids, les dents de la roue à rochet passent successivement sous le doigt, et la roue C ne tourne pas.

Les avantages que présente l'emploi d'un pendule, comme on l'a vu, sont exclusivement réservés aux horloges fixes, car il est clair que les mouvements divers, souvent brusques, que doivent avoir les horloges portatives ou montres, troubleraient complètement les oscillations du pendule et le jeu de l'échappement. On ne s'est donc pas obligé d'imaginer pour les montres un régulateur spécial, qui ne fût pas incompatible avec la mobilité de la machine tout entière, et qui présentât en même temps, autant que possible, les avantages du pendule. Le balancier régulateur, décrit précédemment (fig. 226), satisfait bien à la première condition; mais il est loin de répondre à la seconde. Nous avons vu en effet que ce régulateur, n'osant pas de lui-même, mais recevant toujours la totalité de son mouvement du moteur, devait conserver dans ses oscillations la trace des variations de la force que le moteur transmet aux palettes. C'est Huyghens qui a imaginé le régulateur qui est exclusivement adapté pour les montres.

Ce régulateur n'est autre chose que le balancier dont on vient de parler, muni d'un ressort spiral qui lui donne la propriété d'osciller librement, sans avoir besoin pour cela de l'action du moteur. Ce ressort, que l'on nomme simplement le *spiral*, a la même forme que le ressort moteur décrit précédemment et représenté par la fig. 226, mais il est beaucoup plus délié, et a par conséquent beaucoup moins de force. Son extrémité intérieure est attachée à l'axe du balancier de la montre la fig. 235, et son autre extrémité est fixée à une des platines de la montre. Le spiral prend naturellement une certaine forme d'équilibre. Si l'on fait tourner le balancier dans un sens, soit dans le sens des aiguilles d'une montre, le spiral se trouve déformé; en vertu de son élasti-

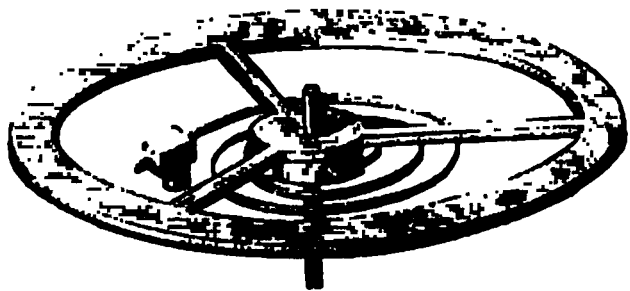


Fig. 235.

lité tend à reprendre la figure qu'il avait précédemment, et ramène le balancier vers sa position primitive. Mais, au moment où

250 APPLICATION A L'ÉTUDE DE QUELQUES MACHES

le spiral a repris exactement sa figure d'équilibre, le balancier animé d'une vitesse en vertu de laquelle il continue à tourner dans le même sens ; le spiral se déforme donc en sens contraire et oppose au balancier une résistance croissante, qui finit par le réduire au repos. Alors le spiral, en continuant à agir sur le balancier, le ramène de nouveau à sa position primitive ; celui-ci passe, et ainsi de suite. Le balancier muni du spiral, après avoir été dérangé de sa position d'équilibre, oscille donc de part et d'autre de cette position, de la même manière qu'un pendule oscille de part et d'autre de la verticale. On peut dire que le spiral est à la place ce que la pesanteur est au pendule. Il est en outre intéressant d'observer que la durée des oscillations du balancier est indépendante de leur amplitude, pourvu que le spiral soit convenablement construit.

§ 473. Il ne suffit pas que les durées des oscillations du balancier muni d'un spiral soient indépendantes de leur amplitude, pour que l'application d'un pareil balancier à un mouvement d'horlogerie en régularise complètement le mouvement ; il faut encore que l'échappement soit tel que le balancier soit soustrait, tant que possible, à l'action du moteur, action qui modifierait la durée des oscillations, suivant qu'elle serait plus ou moins énergique.

On a employé pendant longtemps, et l'on emploie encore dans les montres communes, l'échappement à recul, ou à palettes, que nous avons déjà vu dans la *fig. 230*. Dans ce cas la partie du mécanisme qui sert à régulariser le mouvement est exactement disposée comme l'indique cette figure, avec cette différence cependant que le balancier est muni d'un spiral. La régularité du mouvement obtenue de cette manière est bien plus grande qu'elle n'était avec l'ancien emploi du spiral ; mais elle laisse encore beaucoup à désirer. Le balancier seul a été perfectionné par l'addition du spiral ; le mécanisme a besoin d'être modifié à son tour. Nous allons voir maintenant quels consistent les deux échappements principaux qu'on a employés pour l'échappement à recul, et qui ont permis d'arriver à une plus grande perfection, dans la mesure du temps par les montres.

Le premier dont nous parlerons est l'échappement à cygne. Il est appliqué dans toutes les montres plates. L'axe du balancier au lieu de porter deux palettes, comme dans l'échappement à recul, est taillé d'une manière particulière, dans une portion de sa longueur. La *fig. 236* montre la forme qu'on lui donne. L'axe a été réduite à un demi-cylindre évidé ; et, en outre, une entaille ou crure *c* a été pratiquée dans ce demi-cylindre. C'est la

située au-dessus de cette échancrure, qui joue le rôle le plus important. La dernière roue du mécanisme, celle qu'on nomme roue d'échappement, est placée dans un plan perpendiculaire au plan du balancier, et ses dents, qui s'élèvent au-dessus de sa

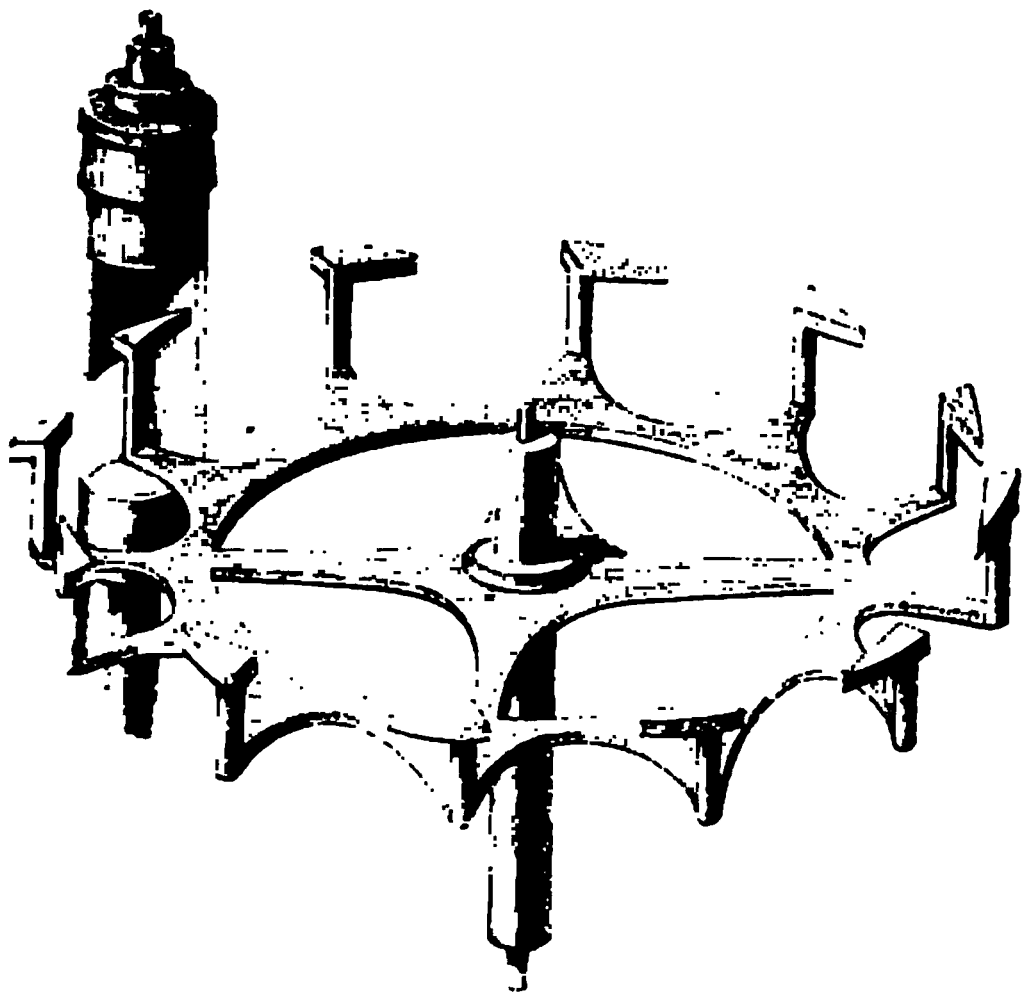


Fig. 237.

ment s'engager dans le cylindre évidé que porte cet axe. Les fig. 238 et 239 font voir de quelle manière le cylindre laisse passer successivement les dents de la roue. En vertu des oscillations du balancier, le cylindre A tourne autour du centre dans un sens, tantôt dans l'autre. Une dent C vient buter contre la surface extérieure du cylindre, fig. 238 : à ce cylindre a pris une autre position, fig. 239, et la dent C a pu marcher sous l'action du moteur, vient buter contre la face intérieure du cylindre : le cylindre, reprenant sa première position, laisse échapper la dent C. et arrête l'impulsion par sa surface extérieure, et ainsi de suite.

L'échappement, tant qu'une dent est arrêtée sur l'une des faces du cylindre, elle ne tend, en aucune manière, à le faire tourner dans un sens ou dans l'autre : le cylindre oscille sous l'action du spiral. Cependant le frottement qu'il éprouve de la part des dents qu'il arrête, joint aux autres résistances qui s'opposent au mouvement du balancier, tend à diminuer l'amplitude de

252 APPLICATION A L'ÉTUDE DE QUELQUES MACHINES.

ses oscillations : et la montre cesserait bientôt de marcher, si le balancier ne restituait de temps en temps au cylindre le mouvement que ces résistances lui font perdre. C'est pour cela qu'on donne aux dents la forme qu'elles présentent extérieurement ; au moment où la dent C, après avoir glissé sur la face extérieure du cylindre (fig. 238, commence à échapper, sa convexité pousse le bord D et accélère ainsi le mouvement du balancier. C'est encore pour

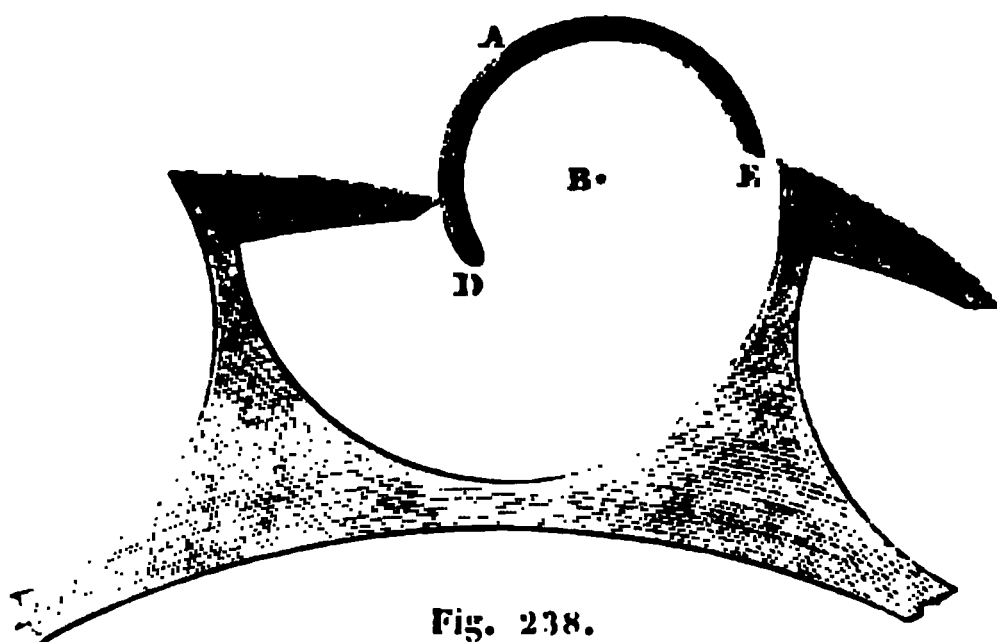


Fig. 238.

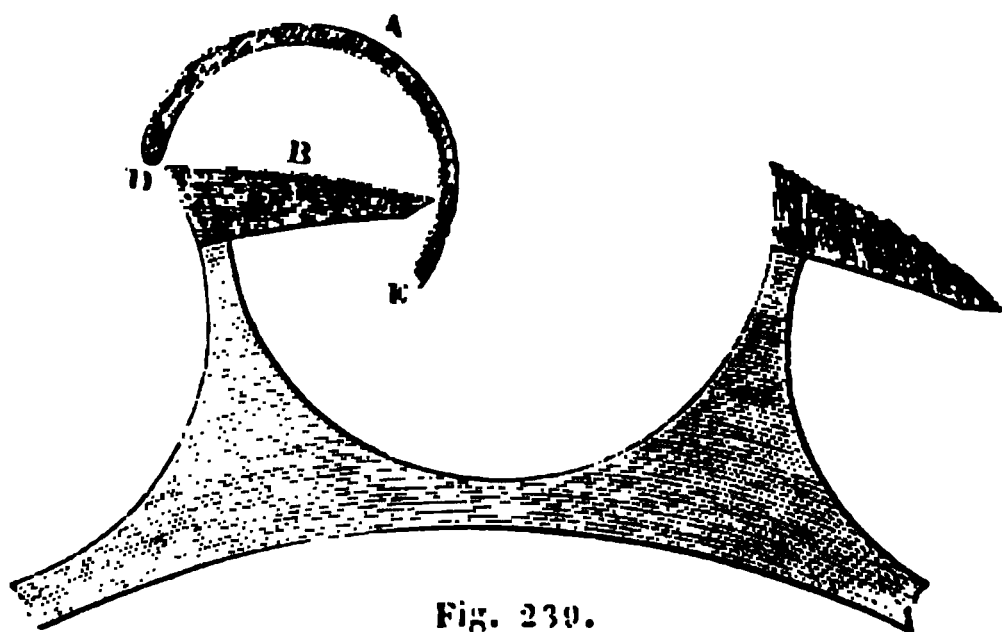


Fig. 239.

même raison que l'autre bord E du cylindre est taillé en biseau lorsque l'extrémité de la dent atteint ce bord, elle glisse sur sa petite face oblique, et donne une impulsion au balancier.

L'échappement à cylindre, que nous venons de décrire, est pour le balancier ce que l'échappement à ancre est pour le pendule. Dans ces deux échappements, tant qu'une dent est arrêtée, soit par le cylindre, soit par l'ancre, elle reste complètement immobile

is l'un, comme dans l'autre, le régulateur est constamment influencé du moteur, influence très faible, il est vrai, l'en existe pas moins, puisque les dents frottent sur la les arrête, et qu'ensuite, au moment où elles se mettent ment, elles donnent une impulsion à cette pièce. L'échappement est excellent, et suffit bien pour les montres ; mais pour la construction des montres marines, qui marcher pendant plusieurs mois sans se déranger sensiblement on a imaginé un autre échappement, dans lequel on a fait que cette influence continuelle du moteur sur le régulateur, sur cela porte le nom d'échappement libre. Voici en quoi il

sort A, fig. 240, dont l'épaisseur diminue progressivement

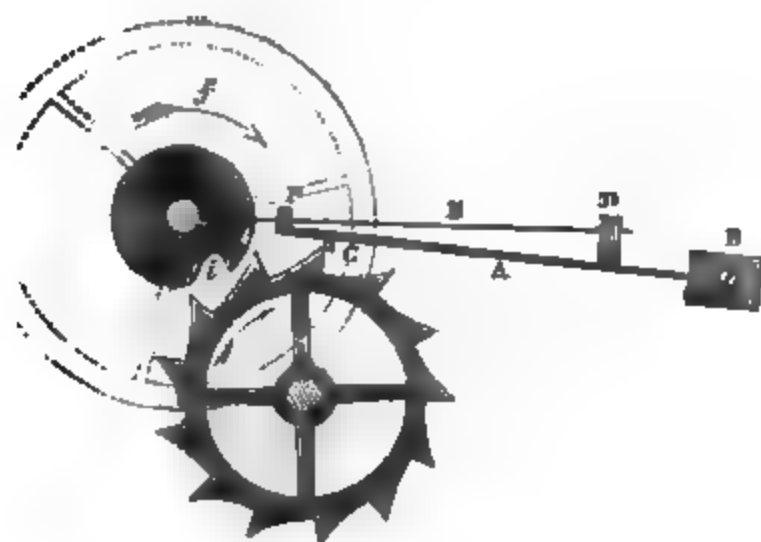


Fig. 240.

et à l'autre, est fixé, par son extrémité amincie, dans un talon sort porte une saillie C, contre laquelle viennent buter successivement les diverses dents de la roue d'échappement. Il porte en un petit talon D, dans lequel est fixé un second ressort très B. Ce second ressort passe sous l'extrémité recourbée d'un F, qui termine le premier ressort ; en sorte qu'il peut s'abaisser sous de ce crochet sans que rien s'y oppose : tandis qu'il s'élève, il entraîne le crochet avec lui, et soulève ainsi le talon A. L'axe G du balancier est muni d'un doigt a, qui oscille avec le temps que lui, et qui rencontre l'extrémité du petit ressort à chaque oscillation. Lorsque le mouvement a lieu dans le sens indiqué par la flèche f, le doigt abaisse le petit ressort en passant le ressort A reste immobile, ainsi que la roue d'échap-

254 APPLICATION A L'ÉTUDE DE QUELQUES MACHINES.

peinent. Dans l'oscillation contraire, le doigt *a* soulève le ressort *C*, celui-ci soulève à son tour le ressort *A*, la dent qu'arrêtait le ressort *C* passe, et cette saillie, ramenée aussitôt dans sa position par le ressort *A*, arrête la dent suivante. Au moment où une dent échappe, une autre dent de la même roue d'échappement vient donner une impulsion au bord d'une entaille pratiquée dans un petit disque fixé à l'axe du balancier; de cette manière le moteur restitue au balancier, par une action presque instantanée, le mouvement qu'il a pu perdre, pendant qu'il a effectué deux oscillations. Sauf le moment où cette impulsion est donnée au balancier, on voit qu'il oscille sans être soumis en aucune façon à l'influence de la force du moteur.

§ 474. Nous avons vu que, dans les horloges dont le régulateur est un pendule, il suffisait d'élever ou d'abaisser la lentille du pendule, d'une quantité convenable, à l'aide de l'écrou qui la soutient, pour que l'horloge ne marche ni trop vite ni trop lentement. On a besoin également de pouvoir agir sur le régulateur d'une montre de manière à atteindre le même but. La durée des oscillations du pendule dépend à la fois de l'intensité de la pesanteur qui le fait mouvoir, et de la forme du pendule lui-même; ne pouvant faire varier la pesanteur, pour modifier la durée des oscillations, on est obligé de changer la forme du pendule, et c'est ce qu'on fait en déplaçant sa lentille. De même la durée des oscillations d'un balancier dépend à la fois de sa forme, et de la force du spiral qui le fait mouvoir; mais, contrairement à ce qu'on fait pour le pendule, c'est en modifiant la force du spiral, et non en changeant la forme du

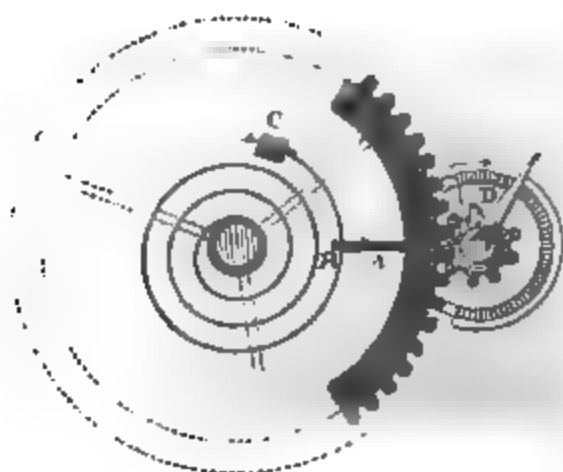


Fig. 241.

balancier, qu'on fait varier cette durée. Pour y parvenir, on dispose dans le voisinage de l'extrémité fixe du spiral une pièce *A*, fig 241, qui présente une échancrure *B*. Le spiral passe dans cette échancrure, et, lorsqu'il oscille, il ne commence à se déformer qu'à partir du point *B*; en sorte que la portion *BC* du spiral est comme si elle n'existait pas, et les choses se passent comme si le spiral se terminait en l

Cette pièce A peut se mouvoir circulairement autour de l'axe du balancier; on la déplace en faisant tourner l'aiguille D vers

qui l'accompagne. Quand on fait marcher cette aiguille dans l'un ou dans l'autre, on produit le même effet que si l'on augmente ou si l'on diminuait la longueur du spiral, et, par suite, on varie sa force ; on peut donc amener par là le balancier à faire des oscillations d'une durée déterminée, ou, en d'autres termes, à accélérer ou retarder la montre, de manière à la régler.

Les variations de température déterminant des dilatations ou des contractions dans les diverses parties d'un pendule ou d'un balancier, en résultent des changements de forme qui font varier la durée des oscillations, et qui, par conséquent, dérangent la marche de l'horloge ou de la montre. On obvie à cet inconvénient en construisant le pendule ou le balancier de matières inégalement dilatables, et les disposant, que leurs dilatations se contrarient, et qu'il résulte aucun changement dans la durée des oscillations. On trouve ainsi des pendules et balanciers *compensateurs* : nous n'entrons pas dans le détail de leur construction.

475. Toutes les fois qu'une horloge fixe doit être installée dans un lieu où l'on ne manque pas de place dans le sens vertical, on emploie un poids comme moteur de cette horloge. Le régulateur est toujours un pendule.

Si l'horloge fixe ne doit occuper que très peu de place, comme les pendules de cheminée, il est impossible de se servir d'un poids comme moteur ; ou bien il faudrait remonter très souvent ce poids, en raison du peu d'espace qu'il aurait à parcourir en agissant sur les rouages. Dans ce cas on emploie un ressort, sans lui adjoindre une fusée, en raison de la bonté du régulateur, qui est toujours un pendule. Les variations de la force du ressort n'influent pas d'une manière notable sur la durée des oscillations de ce régulateur.

Le ressort moteur, et le balancier régulateur muni d'un spiral, sont exclusivement employés dans les montres : elles ne diffèrent des horloges que par l'échappement. Dans les anciennes montres, on employait l'échappement à recul ou à palettes, tel qu'on le voit dans la fig. 230, page 241. Avec cet échappement, il fallait nécessairement se servir d'une fusée, pour rendre uniforme l'action du ressort moteur, malgré les variations de sa force. Dans les montres modernes, on a substitué l'échappement à cylindre à l'échappement à recul, et l'emploi de cet échappement a permis de se passer de fusée. En outre on a pu diminuer beaucoup l'épaisseur de la montre, en raison de la suppression de la fusée et de la palette de rencontre. Dans les montres auxquelles on veut donner la précision possible, on emploie l'échappement libre, et l'on

256 APPLICATION A L'ÉTUDE DE QUELQUES MACHINES.

conserve la fusée, afin d'éviter, autant qu'on le peut, tout de variation dans la durée des oscillations.

§ 476. Lorsqu'on remonte le poids moteur d'une horloge, les ailettes ne rétrogradent pas, ainsi que nous l'avons expliqué précédemment page 246. Mais, pendant toute la durée du remontage, elles sont stationnaires, et elles ne recommencent à marcher que lorsque le remontage est terminé. Il en résulte que, si l'horloge était précisément à l'heure, elle se trouve ensuite en retard de tout le temps pendant lequel les aiguilles n'ont pas marché. Lorsque l'horloge doit marquer le temps d'une manière très précise, comme celles qui servent aux observations astronomiques, il est très important d'éviter ce retard. On y parvient à l'aide de dispositions qui permettent à l'horloge de continuer sa marche, même pendant qu'on le remonte.

Nous allons en indiquer une des plus simples qui est très employée.



Fig. 243.

Deux poulies mobiles A et B, sont soutenues par une corde sans fin qui passe dans les gorges de deux poulies fixes C et D. Deux poids P, p, sont accrochés aux poulies mobiles. Le plus fort des poids, P, tend à entraîner la corde ; et comme les gorges des poulies C et D sont disposées de manière que les cordons qui les soutiennent ne puissent pas y glisser, ces deux poulies fixes tendent à tourner sous l'influence du poids P. La poulie C porte latéralement une roue à rochet, dans les dents de laquelle un doigt E, pressé constamment contre la roue par le ressort F ; et d'après lequel les dents du rochet sont disposées de manière que la poulie C ne peut pas céder au poids P. Quant à la poulie D, elle est liée à la première des roues dentées du mécanisme de l'horloge ; le poids P fait tourner cette poulie et détermine le mouvement de tous les autres engrenages. Le poids p est destiné à tendre suffisamment la corde, pour qu'elle ne glisse pas dans les gorges des deux poulies C et D.

Quand le poids monte, en même temps qu'il descend. Pour remonter l'horloge, il suffit de tirer d'en bas le cordon qui va de la poulie C à la poulie B ; ce cordon

ns que le doigt E s'y oppose, et le poids P est re-
er d'agir sur le cordon qui va de la poulie D à la
ie D, étant toujours soumise à l'action du poids
endant qu'on le remonte, fait tourner les rouages
is aucune interruption.

teur d'une horloge ou d'une montre est un ressort
ent sur les rouages, sans fusée, les choses peuvent
manière que les rouages et les aiguilles s'arrêtent
age : c'est ce qui a lieu précisément sur la *fig. 230*,
avons expliqué dans la page 243. Mais on peut
s, par un simple changement de disposition, faire
ouages et les aiguilles marchent toujours, pendant
sort moteur. Il suffit pour cela que ce ressort soit
rillet fixé à la première des roues du mécanisme,
ite en faisant tourner l'axe auquel est attaché son
re. On voit en effet que, soit qu'on ne touche pas à
soit qu'on le fasse tourner pour enrouler le ressort
l, l'extrémité extérieure du ressort agira toujours
ce du barillet, et fera conséquemment tourner sans
uo qui y est fixée, ainsi que toutes les autres. C'est
sé le ressort moteur des pendules de cheminée, et
ontres plates, dans lesquelles l'échappement à cy-
e supprimer la fusée. Il est clair que l'axe, auquel
ché intérieurement, doit porter une roue à rochet,
urner que dans le sens convenable au remontage.
sort moteur agit par l'intermédiaire d'une fusée, le
tue en faisant tourner la fusée en sens contraire
uel le ressort la fait habituellement tourner. De
chaîne, que l'action du ressort avait entraînée en
tour du barillet, s'enroule de nouveau sur la fusée;
e barillet tourne sous l'action de la chaîne, et en-
l'extrémité du ressort, qui se serre ainsi de plus
son axe. Pour que le mouvement rétrograde, im-
pendant le remontage, ne se transmette pas à tous
ui a adapté une roue à rochet, à l'aide de laquelle
renière des roues de la montre, ainsi qu'on le voit
cette roue à rochet se loge dans l'intérieur de la
n doigt, qui s'y trouve placé, vient s'engager entre
le et la roue dentée ont été écartées l'une de l'autre
afin de bien montrer cette disposition.

ant comment on parvient à faire continuer le mou-
ntre, pendant qu'on la remonte, en enroulant la

258 APPLICATION A L'ÉTUDE DE QUELQUES MACHINES.

chaîne sur la fusée. La roue à rochet *A*, qui fait corps avec la fusée, fig. 244, au lieu d'agir directement sur la première roue de rouage, ne



Fig. 243.

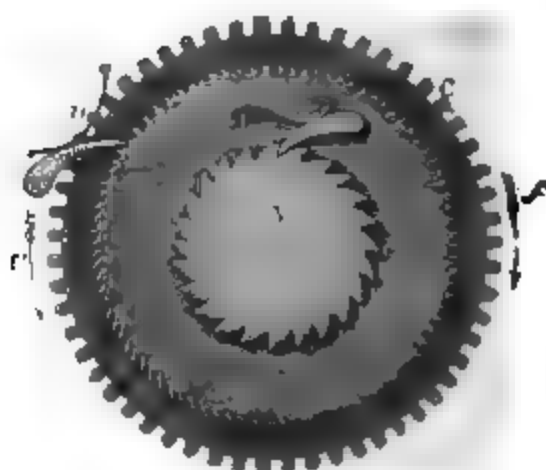


Fig. 244.

n'agit sur cette roue que par l'intermédiaire d'une seconde roue à rochet *B*, dont les dents sont tournées en sens contraire. Lorsque le ressort moteur tend la chaîne et fait tourner la fusée, la roue à rochet *A*, qui en dépend, tourne dans le sens de la flèche *f'* : à l'effet du doigt *m*, cette roue fait tourner, dans le même sens, la roue *B* dont les dents passent ainsi successivement sous le doigt *n*, sans être nullement gênées par ce doigt. Un ressort *abc* est fixé, d'une part en *a* à la roue *B*, et d'une autre part en *c* à la roue *C*. La roue *B*, mise en mouvement comme nous venons de le dire, tire l'extrémité *a* de ce ressort ; il se tend, et tire à son tour la roue *C*, pour la faire tourner dans le même sens. Lorsqu'on fait tourner la fusée, et par suite la roue *A*, dans le sens de la flèche *f'*, pour remonter la montre, la roue *B* ne peut pas la suivre,

à cause du doigt *n* qui l'en empêche ; l'extrémité *a* du ressort *abc* ne pouvant rétrograder, la tension de ce ressort continue à tirer le point *c* de la roue *C*, dans le sens de la flèche *f*, et la montre ne cesse pas de marcher. Ce ressort peut ainsi entretenir seul le mouvement des rouages et des aiguilles, pendant un temps assez long, pour qu'on puisse remonter complètement la montre ; lorsqu'ensuite le ressort moteur reprend son action, il restitue au ressort *abc* la tension qu'il a perdue pendant le remontage.

§ 477. Pour terminer ce que nous avons à dire de l'horlogerie, nous indiquerons la disposition d'une sonnerie, c'est-à-dire du mécanisme spécial qui fait sonner les heures et les fractions d'heure.

en qu'elles sont marquées sur le cadran par les aiguilles. La
 15 représente la sonnerie d'une horloge fixe dont le moteur

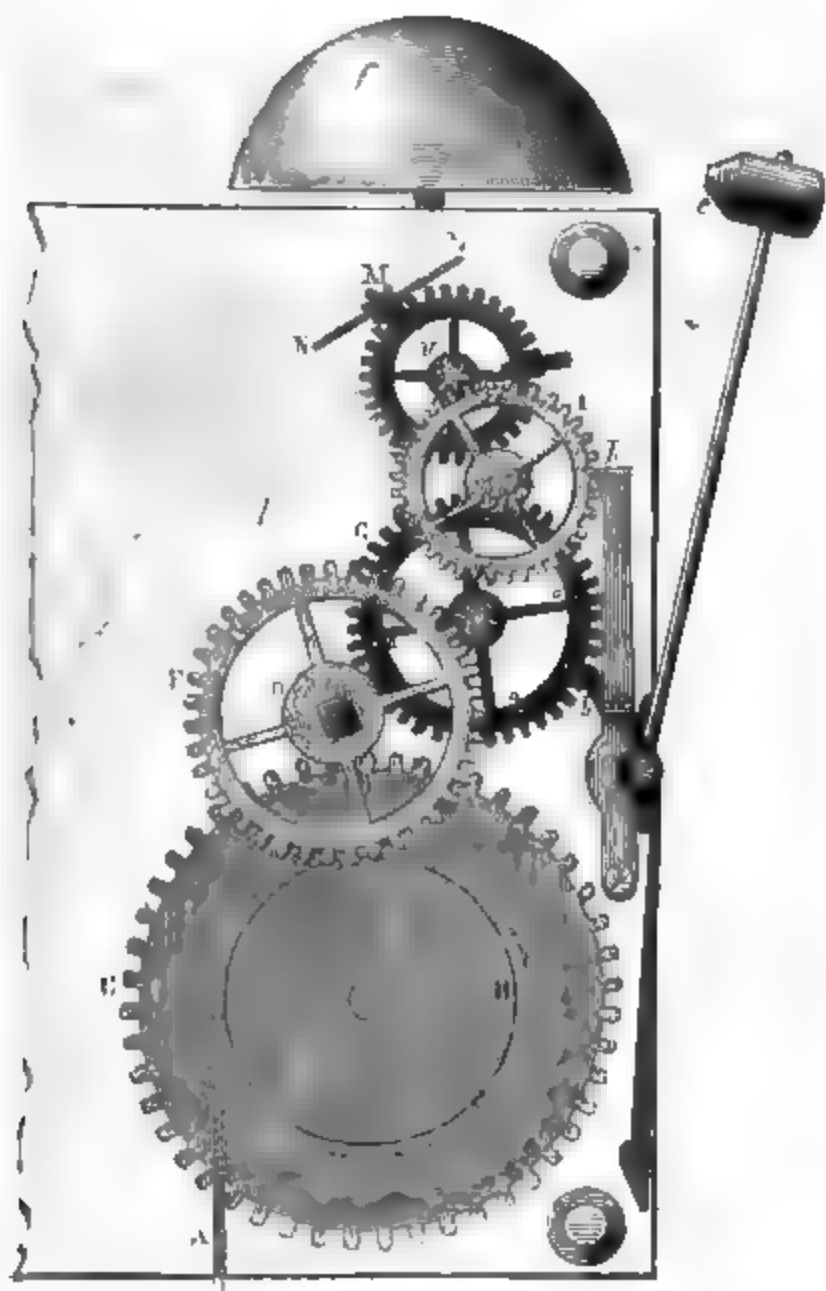


Fig. 245.

1 poids. Cette sonnerie a un moteur spécial, qui est également
 15 ids, attaché à l'extrémité de la corde A. Cette corde s'enroule
 1 cylindre B; le mouvement que le poids moteur tend à lui
 1 ner se transmet à la roue C montée sur le même arbre; la
 1 ongrène avec le pignon D, et fait ainsi tourner une seconde

le levier *b* ; ce levier fait tourner l'axe *c* , auquel est attachée la queue du marteau *e*. Aussitôt qu'une des chevilles *a, a*, agit sur le levier *b*, après l'avoir soulevé, ce levier revient dans sa position primitive, en vertu de l'action d'un ressort, et le marteau est ainsi ramené vers le timbre *f*. Si la queue du marteau était rigide, il ne viendrait pas toucher le timbre. Mais au contraire, elle est flexible et élastique; le marteau peut donc dépasser sa position d'équilibre, en vertu de sa vitesse acquise, et venir frapper le timbre, pour être ensuite brusquement ramené en arrière par l'élasticité de sa queue. On voit par là que le marteau frappe un coup sur le timbre, chaque fois qu'une des chevilles *a, a*, agit pour soulever le levier *b*.

Tant que l'horloge ne doit pas sonner, une cheville *i*, qui agit seule sur le côté de la roue *I*, vient buter sur l'extrémité du levier *gh*. Ce levier, mobile autour du point *g*, est soulevé par un appendice qui dépend du mécanisme de l'horloge, au moment où la sonnerie doit commencer à marcher. Si le levier *gh* est tout de suite dans sa position primitive, la roue *I* est arrêtée et ne fait un seul tour; une seule cheville *a* est venue agir sur le levier *b* et le marteau ne frappe qu'un coup sur le timbre. Pour que le marteau frappe le nombre de coups qui correspond à l'heure indiquée par les aiguilles, on a fixé au levier *gh* un couteau *k*, qui agit sur le contour d'une roue *l* placée en arrière. Tout auto

PORT DIRECT PAR L'HOMME OU LES ANIMAUX. 261

ie se met en mouvement, doit faire un tour entier dans douze heures, qui forme la période de temps au bout de laquelle des heures de même nom. Pendant ce temps-là, il faut faire autant de tours que le marteau doit frapper de coups — à-dire 78 tours, si le marteau ne sonne que les heures — si le marteau doit en outre frapper un coup aux minutes, comme dans les pendules de cheminée.

GÉNÉRALES SUR LE TRANSPORT DES FARDEAUX.

Pour transporter un corps pesant d'un endroit à un autre, sur un sol horizontal, on a toujours besoin d'employer une certaine quantité de travail, quelquefois beaucoup pour un même corps, suivant les circonstances dans lesquelles le transport s'effectue. L'emploi de cette quantité de travail au développement d'une certaine quantité de travail, si l'on y réfléchit, on reconnaît sans peine que ce n'est pas le transport en lui-même qui nécessite ce travail. On voit, en effet, que le corps pouvait glisser ou rouler sur le sol, sans éprouver de résistances passives qui se présentent en pareil cas, et qu'il lui donner une impulsion, aussi légère qu'on voudrait, pour le mettre immédiatement en mouvement; et comme aucune force ne viendrait à ralentir son mouvement, il conserverait indéfiniment la même vitesse. Lorsque ce corps serait arrivé au lieu où on le veut transporter, on l'y arrêterait. Le transport se serait donc effectué sans qu'on ait eu à développer d'autre travail moteur que celui qui correspond à l'impulsion initiale; et encore ce travail, qui peut être extrêmement petit, pourrait-il toujours donner lieu à la production d'une quantité égale de travail utile, au moment où on arrêterait le corps.

Les résistances passives qui se développent dans le transport d'un corps pesant sur un sol horizontal sont donc les seules résistances qu'il faut vaincre dans ce transport; elles seules nécessitent l'emploi d'une force agissant constamment, ou presque constamment, pour que le corps puisse parcourir une distance un peu considérable. On conçoit par là comment il se fait qu'en variant les circonstances du transport, on peut réduire à des proportions si minimes le travail de traction qui entretient le mouvement de fardeaux énormes. Nous allons passer en revue les divers modes de transport employés, en les étudiant surtout sous le point de vue des résistances que chacun d'eux occasionne.

Transport direct par l'homme ou les animaux. — Comme on porte un fardeau, soit dans ses mains, soit sur

262 NOTIONS GÉNÉRALES SUR LE TRANSPORT DES FARDEAUX

son dos, soit de toute autre manière, les résistances passives qui se développent se réduisent simplement à la résistance que l'air éprouve de la part de l'air; et comme la vitesse n'est pas grande, cette résistance est, la plupart du temps, négligeable. La force de traction exercée par l'homme, c'est-à-dire la force qu'il applique au fardeau, horizontalement et dans le sens du mouvement, est donc, pour ainsi dire, nulle. Mais l'opération de porter est accompagnée d'une tension des muscles qui a pour but de soutenir le fardeau, tension qui fatigue l'homme, et qui le fatigue également, quand même il resterait au repos; en outre les muscles des jambes, qui servent à la locomotion, éprouvent une fatigue à cause du jeu qu'ils prennent. Ces diverses causes réunies font que le transport direct d'un fardeau par un homme est très difficile, qu'il ne peut s'effectuer que pour des fardeaux dont le poids n'est pas trop grand; et enfin qu'on ne doit y avoir recours que pour de petites distances à parcourir, lorsque le poids des fardeaux n'est pas trop considérable.

Le transport à dos d'animaux donne lieu à des observations du même genre.

§ 480 **Transport par glissement.** — Lorsque le transport d'un corps pesant s'effectue sans qu'il soit porté par un homme, ou par un animal, ce corps doit s'appuyer sur le sol, soit directement, soit par l'intermédiaire d'un appareil qui sert à le transporter. La pression qu'il exerce en ses points d'appui donne lieu à des résistances qui s'ajoutent à la résistance de l'air, pour s'opposer à son mouvement. Si le corps repose simplement sur le sol, et qu'on le fasse mouvoir par glissement, on développe un frottement qui est souvent très intense. C'est ce qui a lieu, par exemple, lorsqu'on transporte de longues pièces de bois en les faisant traîner par des chevaux, à l'aide de chaînes attachées à l'une de leurs extrémités. C'est encore ce qui a eu lieu dans le transport de l'obélisque dont nous avons parlé précédemment lorsqu'on l'a fait glisser en Égypte, avant de l'introduire sur le navire, et à Paris, après l'en avoir extrait (§§ 447 et 448).

Dans de pareils mouvements, la résistance à vaincre dépend de la nature des surfaces qui glissent l'une sur l'autre. Pour diminuer la résistance, on fait en sorte que ces surfaces se composent de matières qui glissent facilement; on les polit, on les enduit quelquefois de matières grasses, qui diminuent la résistance au frottement pour une même pression. Nous en avons vu un exemple dans le transport de l'obélisque; on l'a fait glisser sur un plan couvert de madriers qu'on entretenait constamment graissés.

emploie pour transporter des pièces de vin ou de
r des villes, *fig. 246*, sont garnis en dessous de

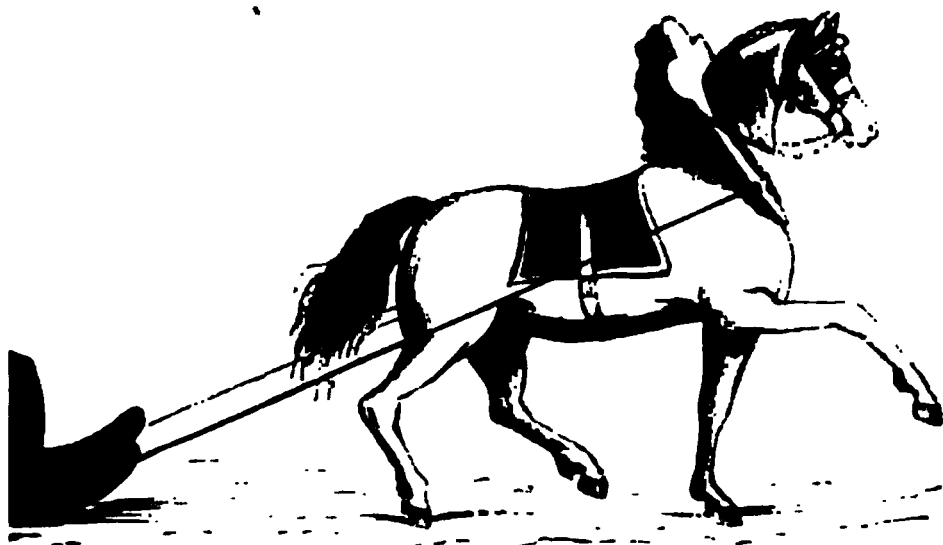


Fig. 246.

leur permettent de glisser plus facilement sur le
, dont on se sert pour patiner sur la glace, ne sont
des lames de fer que l'on attache sous ses pieds,
ndre presque nulle la résistance qui se développe
isse.

Transport par roulement. — Lorsqu'un corps est
sa forme, de rouler facilement sur le sol, on en pro-
porter; la résistance qu'on a à vaincre dans ce cas
beaucoup plus faible que celle qu'on éprouverait
ser. Vitruve rapporte que ce moyen fut employé
architecte du fameux temple de Diane d'Éphèse,
des fûts de colonne qui pesaient 250 000 kilo-
effet il leur adapta une monture de bois, destinée
une force de traction, comme on le fait pour les
se sert en agriculture. C'est de la même manière
ansporte facilement une pièce de vin à une petite
oussant pour la faire rouler devant lui.

ue la forme d'un fardeau se prête à ce mode de
on parvient d'une autre manière à remplacer le
n roulement. Si le fardeau présente une face plane
a peu grande, on le fait reposer par cette face sur
e bois, *fig. 247*, placés sur le sol, à une certaine
l'autre, et dans des directions perpendiculaires à
nent qu'on veut produire. Lorsque ensuite on tire
ce fardeau, il marche, en faisant rouler les rou-

266 NOTIONS GÉNÉRALES SUR LE TRANSPORT DES FARDEAUX ; et, si le sol n'est pas trop irrégulier, le déplacement se fait sans qu'il y ait glissement, ni des rouleaux sur le sol,



Fig. 247.

deux sur les
Il résulte
a été dit à
paragraphe
la force
pour faire
ainsi un far
d'autant plus
que le diamètre
rouleaux
petit ; et qu'en
conséquence, il

est dangereux de prendre des rouleaux d'un aussi grand diamètre pourra.

Le mode de transport dont nous venons de parler présente un grave inconvénient, qui fait qu'on n'y a recours que lorsque la distance à parcourir est petite. Il consiste en ce que les rouleaux marchent pas aussi vite que le fardeau. Si l'on examine ce qui se passe pendant le mouvement, on verra que chaque rouleau roule bien sur le sol, dans le sens même du déplacement du fardeau ; mais il ne touche pas ce fardeau toujours au même point : il roule sous sa face inférieure, en sens contraire, de manière à toucher successivement en des points de plus en plus éloignés de la portion du fardeau qui est en avant. On voit aisément que le rouleau fait un tour entier en roulant sur le sol, à-dire pendant qu'il s'avance d'une quantité égale à la longueur de sa circonférence, le fardeau marche d'une quantité égale à la moitié de cette longueur ; la vitesse avec laquelle le rouleau roule sur le sol n'est que la moitié de celle du fardeau. Il faut donc qu'après un déplacement de peu d'étendue, l'un des rouleaux est tellement resté en arrière, qu'il ne supporte plus rien ; on est donc obligé de le reporter sur la partie antérieure du fardeau ; plutôt, pour éviter le mouvement de bascule qui se produit au moment où le corps commence à ne plus s'appuyer que sur un seul rouleau, on a soin de disposer en avant un troisième rouleau, qui se trouve engagé sous le fardeau avant que le rouleau arrière cesse d'agir.

§ 482. **Transport sur des roues.** — Pour faire cesser l'inconvénient que nous venons de signaler dans le transport sur des rouleaux, il n'y a qu'à les remplacer par des roues.

Roulant sur le sol, restent toujours attachées au fardeau, et le suivent dans son mouvement. C'est ce qu'on fait en employant des **roues** : et, pour ne pas être obligé de fixer les axes de ces roues aux **divers fardeaux** qu'on peut avoir à transporter, on se sert de **brancards**, auxquels les roues sont adaptées, et sur lesquels les fardeaux **doivent** être placés. Telle est l'origine des voitures de diverses formes, qui servent, comme on le voit tous les jours, à transporter **des voyageurs**, des marchandises, des matériaux de construction, **et** en un mot toutes sortes de fardeaux.

Dans le transport sur des roues, il y a à la fois roulement de la **roue** sur le sol, et glissement de l'essieu dans la boîte de la roue : **le frottement** n'est donc pas complètement évité, comme dans l'emploi des rouleaux. Mais l'influence de ce frottement est d'autant **plus faible** que le rapport du diamètre de la roue au diamètre de **sa** boîte est plus grand ; car plus ce rapport sera considérable, moins **le déplacement** du point d'application de la force de frottement sera **grand**, pour un même chemin parcouru par la voiture, et par conséquent plus le travail résistant occasionné par cette force de frottement sera petit. La grandeur du diamètre de la roue présente **encore** un autre avantage : c'est que plus ce diamètre est grand, plus doit être petite la force appliquée au brancard, et, par suite, à son centre, pour vaincre la résistance au roulement (fin du § 427).

Le transport sur une brouette, telle que celle qui est figurée à la page 23, tient à la fois du transport direct dont nous avons parlé au § 479, et du transport sur des roues. En effet, le poids de la brouette, et du fardeau qu'elle contient, se décompose en deux parties dont l'une est supportée par la roue, et l'autre par les mains de l'homme qui tient les manches ; cet homme a donc, à la fois, à supporter la dernière portion de ce poids, et à pousser la brouette horizontalement, pour vaincre les résistances qu'occasionne la première portion.

Lorsqu'on se sert d'une voiture, munie de deux roues qui tournent autour des extrémités d'un même essieu, le poids du brancard, avec tout ce qu'il porte, se décompose également en deux parties, dont l'une est supportée par les deux roues, et l'autre par l'homme ou l'animal qui doit agir sur les limons. Mais il y a une différence essentielle avec la brouette : c'est qu'on dispose habituellement la charge que doit porter la voiture de manière que son centre de gravité soit à peu près sur le plan vertical qui passe par l'axe de l'essieu. L'homme ou l'animal qui doit exercer horizontalement une force de traction pour faire marcher la voiture n'a de

266 NOTIONS GÉNÉRALES SUR LE TRANSPORT DES FAIBLES

cette manière qu'à agir faiblement sur les limons, dans le sens vertical, pour maintenir le brancard dans une position convenable.

Quand on emploie une voiture à quatre roues, le brancard et la charge ont toujours leur centre de gravité tellement placé, que la verticale qui le renferme passe à l'intérieur du quadrilatère formé par les points d'appui des quatre roues avec le sol. Aussi n'a-t-elle plus besoin d'exercer aucune action dans le sens vertical, pour maintenir le brancard horizontal : il suffit de tirer la voiture, dans le sens du mouvement qu'on veut produire, pour vaincre les résistances occasionnées par le roulement des roues sur le sol, par le glissement des essieux dans les boîtes des roues, et par l'air que la voiture vient rencontrer dans son mouvement.

§ 483. **Stabilité des voitures.** — D'après ce que nous avons dit, on doit donner d'assez grandes dimensions aux roues d'une voiture, pour atténuer autant que possible l'effet des résistances au roulement et au glissement. Il s'ensuit que la charge de la voiture se trouve habituellement élevée d'une quantité assez considérable au-dessus du sol. Cette disposition ôte de la stabilité à la voiture : c'est-à-dire qu'elle est plus exposée à se renverser sur le côté, par suite des inégalités que présente le chemin qu'elle parcourt. Pour

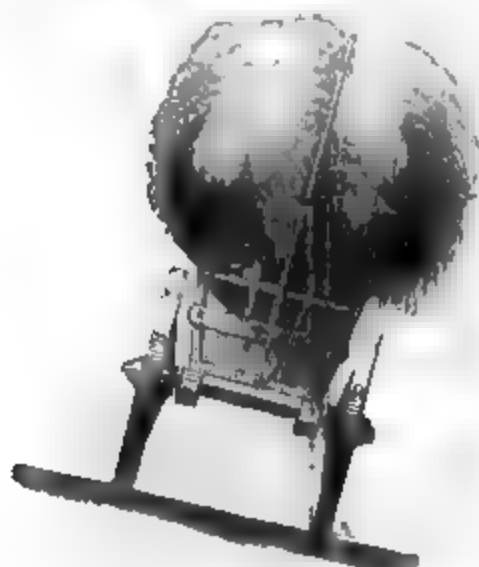


Fig. 248.

que la voiture ne verse pas, il faut que la verticale, passant par son centre de gravité G , fig. 248, rencontre toujours le sol entre les points par lesquels les roues la touchent. Or on voit que, plus ce centre de gravité sera élevé, moins la voiture devra être penchée sur le côté, pour que la verticale qui le contient sorte des limites qui viennent de lui être assignées.

Lorsqu'une voiture est en mouvement sur un chemin incliné transversalement, et qu'en conséquence elle penche vers le côté le plus bas du chemin, la vitesse qu'elle possède influe beaucoup sur sa stabilité. Pendant qu'elle marche, elle penche ordinairement d'une manière irrégulière, tantôt plus, tantôt moins, suivant qu'elle se trouve dans telle ou telle partie du chemin. Pour analyser ce qui se passe en pareil cas, nous pouvons regarder la

re comme animée de deux mouvements bien distincts : le premier est son mouvement de translation dans le sens de la longueur du chemin ; le second est un mouvement de rotation autour de la roue horizontale menée au point A de la roue la plus basse. En raison de ce second mouvement, le centre de gravité G décrit un arc de cercle ayant son centre sur la tangente dont on vient de parler ; tantôt il monte, tantôt il descend sur cet arc de cercle. Pour que la voiture ne verse pas, il faut que le point G ne dépasse jamais le point le plus élevé B du cercle ; autrement la pesanteur, agissant sans cesse sur elle, continuerait à la faire tourner autour de la tangente à la roue au point A, et la ferait ainsi tomber de ce côté. Au moment où la roue de gauche rencontre une aspérité du chemin qui la force à s'élever, le centre de gravité monte sur l'arc de cercle qu'il est obligé de décrire. Si la voiture va lentement, la pesanteur maintiendra la roue de gauche en contact avec le sol, tant que le centre de gravité n'aura pas dépassé le point B. Mais si la voiture va vite, les aspérités que la roue de gauche rencontrera la forceront à s'élever rapidement ; le centre de gravité se trouvera, pour ainsi dire, lancé de bas en haut sur son arc de cercle : en vertu de la vitesse de rotation que la voiture recevra ainsi, la roue de gauche s'élèvera de manière à ne plus toucher le sol : il pourra arriver que le centre de gravité monte ainsi jusqu'au point B, la pesanteur n'ayant pas eu le temps de détruire son mouvement ascendant avant qu'il atteigne ce point. On conçoit par conséquent il se fait qu'une voiture verse, quand elle marche rapidement sur un chemin, dont la pente transversale ne l'aurait pas fait verser, si sa vitesse eût été moins grande.

Les voitures suspendues sont plus susceptibles de verser que celles qui ne le sont pas, ainsi que nous allons le faire comprendre plus clairement. Les ressorts de suspension sont destinés à atténuer les secousses que la voiture reçoit à cause des inégalités du chemin. Les secousses sont éprouvées d'abord par les roues et l'ensemble des essieux qui sont fixées aux essieux : elles se transmettent ensuite au corps de la voiture, par l'intermédiaire des ressorts, qui en amoindrissent l'effet en fléchissant plus ou moins. Lorsque le chemin présente des inégalités qui font pencher la voiture de côté et d'autre, une quantité plus ou moins grande, le corps de la voiture ne penche pas de même que s'il était fixé aux roues sans l'interposition des ressorts. Si une roue est brusquement soulevée par une aspérité, le corps de la voiture ne cède pas tout de suite à ce mouvement ; les ressorts fléchissent, et il en résulte que la roue qui a été soulevée n'a fait, pour ainsi dire, que se rapprocher du corps

Il est aisé de conclure de ce qui précède, que les diligences employées sur les routes, pour le transport des voyageurs, sont dans une très-mauvaise disposition, sous le rapport de la stabilité, à cause de la cumulation des bagages, à leur partie supérieure, fait de gravité de toute la voiture, lorsqu'elle est chargée d'un poids très-élevé au-dessus du sol, et les balancements qu'elle éprouve de la route lui transmettent, par l'intermédiaire des ressorts, un besoin d'être bien grands pour qu'elle verse.

§ 184. **Tirage des voitures.** — La grandeur du tirage, c'est-à-dire de la force de traction qui doit être appliquée à une voiture pour vaincre les résistances passives qui tendent à ralentir son mouvement, change beaucoup avec les circonstances dans lesquelles le mouvement a lieu. Des expériences ont été faites pour déterminer la valeur de cette force, et les lois des variations qu'elle éprouve dans les divers cas. Nous allons indiquer les principes auxquels on est parvenu.

En faisant varier seulement la charge de la voiture, et la faisant marcher toujours sur le même chemin, on a trouvé que le tirage était sensiblement proportionnel à la pression exercée sur le chemin, c'est-à-dire au poids de la charge et au poids de la voiture elle-même. C'est ce qui devait être, puisque les résistances au glissement et au roulement

is avons dit sur la perte de travail occasionnée par les 3).

la manière dont le tirage varie avec la nature du chemin, une idée en examinant le tableau suivant, qui donne le tirage au poids total de la voiture, dans les circonstances présentent le plus habituellement, et avec les roues généralement adoptées.

| NATURE DU CHEMIN. | RAPPORT
du tirage
à la
charge totale |
|---|---|
| urel, non battu, argileux, sec. | 0,230 |
| urel, non battu, siliceux et crayeux | 0,163 |
| me battu et très uni. | 0,040 |
| a sable ou cailloutis nouvellement placés. | 0,123 |
| n empièrrement à l'état d'entretien ordinaire | 0,080 |
| n empièrrement parfaitement entretenu et roulante. | 0,033 |
| avée, voiture suspendue. | 0,030 |
| } au pas. | 0,070 |
| } au grand trot. | 0,070 |
| pont en madriers de chêne non rabotés | 0,022 |
| ornières plates de fonte ou de dalles très dures. | 0,010 |
| e fer à ornières saillantes, en bon état. | 0,007 |
| e fer, id., les essieux étant continuellement graissés. | 0,003 |

au met en évidence le grand avantage que présentent, rapport du tirage, les chemins de fer à ornières saillantes, et les chemins de fer tels qu'on les construit partout. Sur ces chemins, on peut, avec une même force, traîner une charge beaucoup plus grande que sur les routes ordinaires, quel que soit leur état d'entretien. Nous donnerons un peu plus loin des détails sur leur disposition.

Transport sur un chemin incliné. — Dans le transport sur un chemin incliné, seul ou avec une voiture, le poids du chemin horizontal, le poids de la voiture, s'il y en a une, n'a aucune influence directe. Ce poids ne produit directement aucun effet, ni pour accélérer le mouvement, ni pour accélérer le mouvement, en vertu de résistances passives proportionnelles, et qui doivent être vaincues par la force de traction. Le poids est plus de même, lorsque

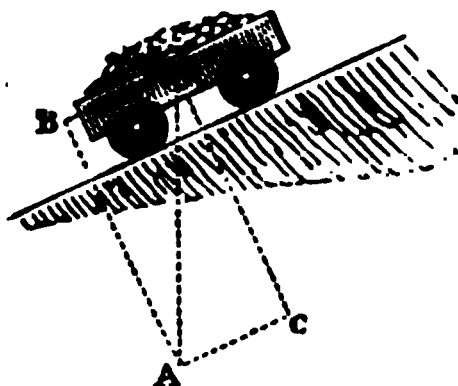


Fig. 249.

est mis en mouvement sur un chemin incliné. Son

270 NOTIONS GÉNÉRALES SUR LE TRANSPORT DES FARDEAUX

poids, qui est toujours une force verticale, appliquée à son centre de gravité G , *fig. 249*, peut être décomposé en deux forces GB , GC , dont l'une est parallèle au chemin, et l'autre lui est perpendiculaire. La dernière composante, celle qui est perpendiculaire au chemin, ne tend ni à augmenter, ni à diminuer la vitesse du fardeau; mais c'est elle qui donne lieu au développement des résistances au glissement et au roulement, et ces résistances lui sont proportionnelles. Quant à la première composante, celle qui est parallèle au chemin, elle agit tout entière et tend soit à augmenter, soit à diminuer la vitesse, suivant qu'elle est dirigée dans le sens du mouvement ou en sens contraire.

Lorsqu'on fait monter le fardeau sur le chemin incliné, la force de traction qu'on lui applique doit être capable de vaincre, à la fois, les résistances passives auxquelles le mouvement donne lieu, et la composante du poids du fardeau qui est dirigée parallèlement au chemin. La pression exercée par le fardeau sur le chemin est même plus grande que si le chemin était horizontal, puisque cette pression n'est qu'une composante de son poids: l'inclinaison du chemin détermine donc une diminution dans les résistances passives qui résultent de cette pression. Mais si la force de traction, qui doit être appliquée au fardeau, pour le faire monter, éprouve une diminution sous ce rapport, cette diminution est plus que compensée par l'augmentation qu'elle doit recevoir pour vaincre la composante GB , *fig. 249*, du poids du fardeau. En définitive, il faudra une plus grande force pour faire monter le fardeau sur un chemin incliné, que pour le faire mouvoir sur un chemin horizontal, et cette force sera d'autant plus grande que l'inclinaison du chemin sera plus prononcée.

Lorsqu'un fardeau descend le long du chemin incliné, la composante de son poids, qui est parallèle au chemin, agit dans le sens du mouvement. Cette composante fait donc équilibre à une portion des résistances passives, et la force de traction qu'on doit appliquer au fardeau n'a plus à vaincre que l'excédant de ces résistances. Si l'on observe d'ailleurs que la pression exercée sur le chemin est, comme dans les cas précédents, plus faible que si le chemin était horizontal, on verra que l'inclinaison agit de deux manières différentes pour diminuer la force de traction: en rendant les résistances passives plus faibles, et en donnant lieu à une composante du poids, qui fait équilibre à une partie de ces résistances. La diminution qu'éprouve dans ce cas la force de traction est d'autant plus grande que le chemin est plus incliné. Si l'inclinaison est assez

3, cette force peut être réduite à zéro : alors la composante $P \sin \alpha$, dirigée parallèlement au chemin, fait seule équilibre aux résistances passives. Si l'inclinaison est encore plus grande, non seulement on ne devra pas tirer le fardeau pour entretenir son mouvement, mais encore il faudra le retenir en lui appliquant une force dirigée en sens contraire du mouvement, si l'on veut que son mouvement ne s'accroisse pas indéfiniment. On voit en effet que, sur une pareille inclinaison, les résistances passives sont mises en équilibre par une portion de la composante du poids, qui agit dans le sens du mouvement, et l'autre portion de cette composante augmenterait sans cesse de la vitesse du corps, si l'on ne s'opposait à son action. C'est ainsi qu'on, lorsqu'une voiture descend sur un chemin fortement incliné, les chevaux qui sont attelés à la voiture sont obligés de la retenir, pour empêcher son mouvement de s'accroître outre mesure. Il arrive même souvent, lorsqu'il s'agit d'une voiture pesamment chargée, et tirée par plusieurs chevaux placés les uns devant les autres, qu'on détache les chevaux, à l'exception du premier, pour les attacher derrière la voiture dans les fortes descentes ; ils sont alors en mesure de résister, pour détruire la portion de la composante du poids de la voiture, qui n'est pas mise en équilibre par les résistances passives.

Pour faciliter la retenue des voitures dans les descentes, on leur

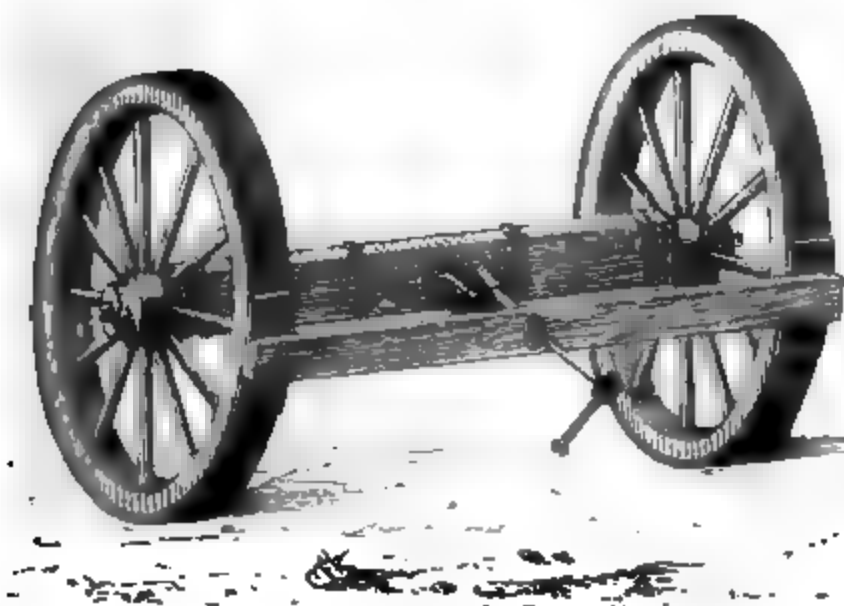


Fig. 230.

se munissent ordinairement des freins à l'aide desquels on peut augmenter les résistances passives. Ce sont des plaques de fer, ou des

272 NOTIONS GÉNÉRALES SUR LE TRANSPORT DES FAN

morceaux de bois qu'on dispose en arrière, tout près des roues, à la hauteur de l'essieu, fig. 250. On serre le frein contre les roues, à l'aide d'une vis placée, soit à l'arrière de la voiture, soit sur le devant; dans ce dernier cas, on transmet l'action au frein par l'intermédiaire de cordes et de leviers combinés. La pression du frein contre les jantes des roues détermine un frottement, qui s'ajoute aux autres résistances par frottement est plus ou moins fort, suivant que le frein est plus ou moins serré; mais il ne peut pas croître au delà d'une certaine limite. On voit, en effet, que si le frein était trop fortement serré, son adhérence avec les jantes des roues empêcherait ces roues de tourner; et les roues glisseraient sur le chemin, comme si elles avaient été invariablement fixées à leur essieu. Le frottement par frottement, qui résulte de la pression du frein contre les jantes des roues, ne peut donc pas devenir plus grand que le frottement d'adhérence des roues elles-mêmes sur le chemin, lorsqu'elles ne tournent pas. Or, que la pression du frein est capable de déterminer un frottement plus considérable, les roues s'arrêtent; ce frottement ne change pas, et il est remplacé par le frottement des roues sur le chemin.

Il y a un inconvénient à serrer le frein contre les roues trop fortement pour que celles-ci ne tournent plus; il consiste en ce que les roues, glissant au lieu de rouler, s'usent d'une manière en un point de leur contour, et par conséquent ce contour devient un peu irrégulier. Pour empêcher cette usure de se produire, dans les cas où l'on peut avoir besoin de remplacer un point d'une roue par un glissement, on se sert d'une pièce qu'on nomme un sabot, et qu'on place sous la roue, de manière à lui faire supporter toute l'usure qui peut être occasionnée par le glissement. Pour cela il suffit de mettre le sabot en avant de la roue, de telle sorte que celle-ci vienne se poser dessus et

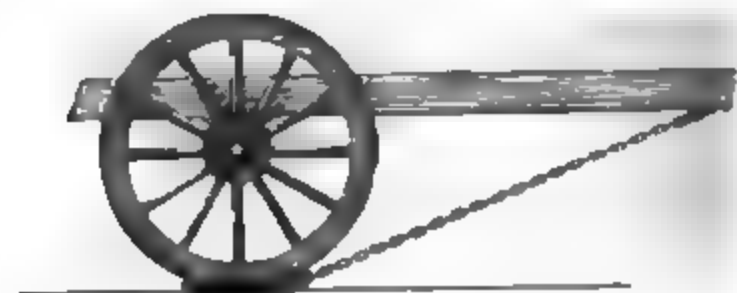


Fig. 251.

Une chaîne longue et flexible se fixe au bras de la voiture et trouve son point d'appui au lieu de s'appuyer sur la roue.

La voiture, continuant à s'avancer, entraîne le sabot et celle-ci ne tourne plus.

employer un frein pour l'empêcher de tourner.
Des de fer. — Nous avons vu, par le tableau de la
 en la nature du chemin influe sur le tirage des voi-
 • diminuer ce tirage autant que possible qu'on a
 mins de fer, sur lesquels, avec une même force de
 traîner des fardeaux beaucoup plus lourds que sur
 ires.

construit des chemins à ornières creuses de fonte,
 voulaient des roues amincies vers les bords et pré-
 • de lentilles. Mais ces ornières creuses, dont on
 ar les ornières qui se produisent naturellement sur
 nt pas tardé à présenter un grave inconvénient : il
 es ordures de toutes sortes, qui nuisaient beaucoup
 oulage, et qui faisaient ainsi disparaître une grande
 ages qu'on en attendait. Ces chemins à ornières
 : existent encore en Angleterre dans des mines, et
 'acc de la terre, dans le voisinage de ces mines.
 istribuit plus aucun, à cause de l'inconvénient qui
 alé.

e fer à ornières saillantes sont généralement adop-
 Les ornières saillantes, ou *rails*, sont de fer forgé :
 barres, amincies vers le milieu de leur largeur, et
 hamp, au bout les unes des autres. Des traverses
 rées de distance en distance, dans un sens perpen-
 ection du chemin ; chacune de ces traverses porte



Fig. 252.

de fonte, qui sont solidement fixés sur sa surface ; les
 uits dans l'ouverture des coussinets, et y sont assu-
 coins de bois qu'on y enfonce avec force, fig. 252.

274 NOTIONS GÉNÉRALES SUR LE TRANSPORT DES FAN

Les roues des voitures ou *wagons*, qui circulent sur ces rails, ne pourraient se maintenir sur la face supérieure des rails si la jante ne présentait un rebord, ou *boudin*, disposé vers l'intérieur de la voie, *fig. 253*. Les boudins des deux roues qui correspondent à un même essieu, descendent entre les deux rails, un peu sous de leur face supérieure, et empêchent ainsi les deux roues de sortir de la voie, ou comme on dit, de dérailler.

Lorsque les roues tendent à s'écarter de la voie, d'une vers l'autre, les boudins s'y opposent, en venant s'appuyer sur la face intérieure de l'un des rails; il en résulte un frottement des boudins contre le rail, et cela augmente le tirage. C'est pour ce frottement, qu'on donne aux jantes des roues une forme conique, comme le montre la *fig. 253*. On incline un peu les rails vers l'intérieur de la voie, et on leur donne une largeur un peu plus grande que la distance qui existe entre

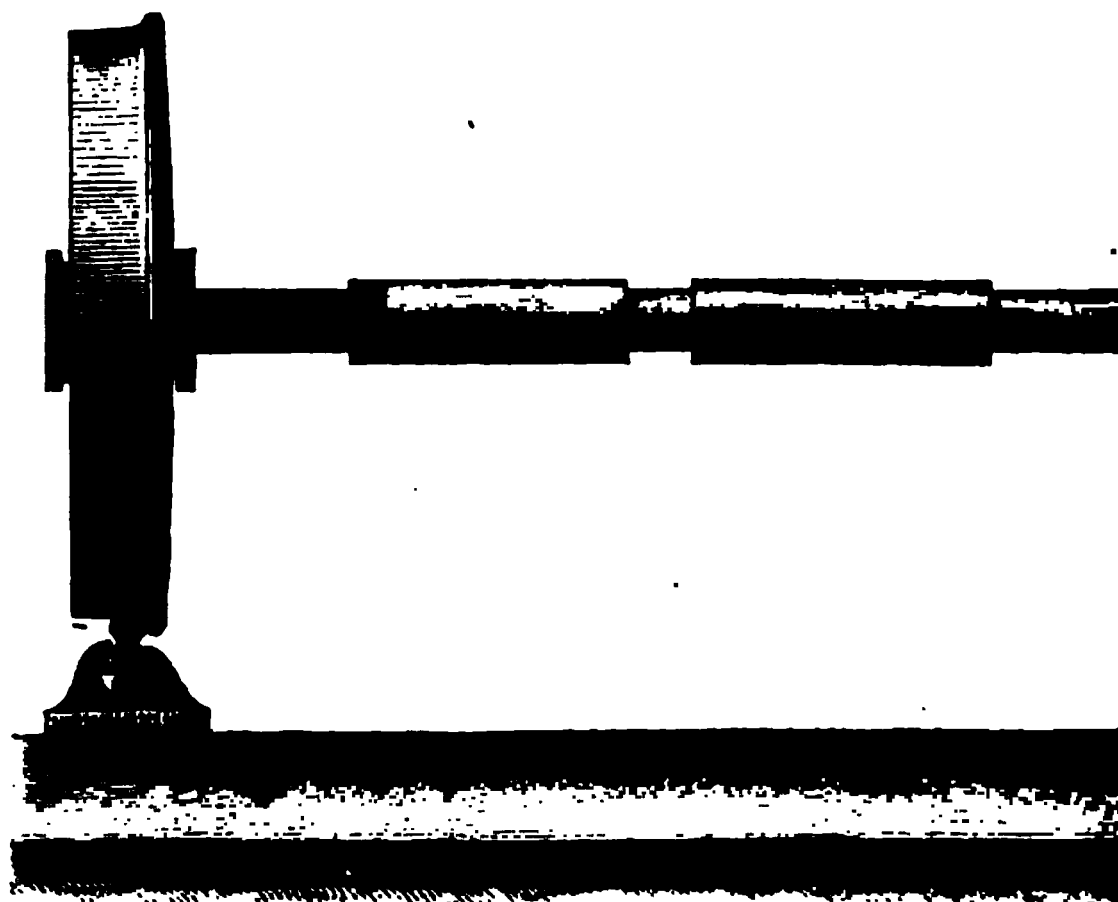


Fig. 253.

extérieurs des boudins de deux roues correspondantes. De cette manière la pesanteur, en agissant sur les wagons, fait presser les jantes des roues sur les deux rails, autant que le permet l'écartement, et maintient les deux boudins à une petite distance des faces intérieures des rails. Si, par une cause quelconque, un des boudins vient à toucher le rail correspondant, il le repousse

renir à la position que la pesanteur tend constamment

les boudins remplissent toujours bien leur objet, et que aient une stabilité suffisante sur les rails, tout en se x une grande rapidité, il est indispensable que les roues aient bien verticales, c'est-à-dire qu'elles ne penchent érieur ni vers l'extérieur de la voie. Pour assurer cette ne dispose pas les roues de la même manière que dans ordinaires. Au lieu de fixer chaque essieu à la voiture, tourner les roues autour de ses deux extrémités, on fixe l'essieu, et on le rend mobile avec elles; il tourne dans ets adaptés à la partie inférieure du wagon.

des roues aux essieux entraîne une conséquence que s signaler. D'après cette disposition, les deux roues qui es aux deux extrémités d'un même essieu, doivent tourner le: elles font nécessairement un même nombre de tours nps donné. Cela ne gêne en rien le mouvement, quand r une voie droite; mais il n'en est pas de même quand courbe. Dans une voie courbe, le rail extérieur, c'est-à- qui est placé du côté de la convexité de la voie, est plus rail intérieur; si les deux roues étaient libres de tourner nment l'une de l'autre, celle qui repose sur le rail exté- it plus de chemin à parcourir que celle qui repose sur ieur, ferait plus de tours que cette dernière, dans le s. Lorsqu'au contraire elles sont fixées à l'essieu, elles es de s'accorder constamment dans leur mouvement. Si repose sur le rail intérieur roule de la même manière tait seule, elle oblige l'autre roue à ne pas tourner au- le ferait sans sa liaison avec la première; et il en ré- ette autre roue doit glisser sur son rail, d'une quantité ifférence entre les longueurs des deux rails. Si ce n'est extérieure qui glisse, ce sera la roue intérieure; ou bien out chacune d'une certaine quantité, l'une dans un sens, ens contraire. Quoi qu'il en soit, le roulement de deux s, fixées sur un essieu, ne peut s'effectuer sur une voie s qu'il se produise un glissement; ce glissement déter- ttement, qui augmente d'autant le tirage. Si l'on veut ver tous les avantages que présente un chemin de fer, ort de la petitesse du tirage qu'il nécessite, en maintenant es aux extrémités de leurs essieux, il faut éviter de hemin des courbures trop prononcées: on devra le for- s droites, raccordées par des courbes d'un grand rayon.

276 NOTIONS GÉNÉRALES SUR LE TRANSPORT DES FARINES

Lorsqu'un wagon marche rapidement dans une partie courbe de la voie qu'il parcourt, son mouvement donne lieu au développement d'une force centrifuge très sensible, dirigée horizontalement perpendiculairement à la voie, et du côté de la convexité de la courbe. Cette force centrifuge tend à faire sortir le wagon de la voie, et il en résulte que les boudins des roues qui se trouvent du côté de cette convexité viennent frotter contre le rail extérieur. Pour éviter ce frottement, on dispose le rail extérieur un peu plus haut que l'autre, dans toute la longueur de la partie courbe, de sorte que, quand un wagon se trouve dans cette partie du chemin, il se trouve comme sur un plan incliné transversalement. La différence de niveau des deux rails a été déterminée de telle manière, que la résultante du poids du wagon, et de la force centrifuge qui se développe lorsqu'il est animé de la vitesse ordinaire, soit dirigée perpendiculairement au plan qui passe sur les faces supérieures des rails. Par cette disposition, les deux boudins sont maintenus chacun à une certaine distance du rail dont il est voisin, tout aussi bien lorsque le wagon marche sur une voie droite, et que les deux rails sont placés au même niveau.

Nous verrons bientôt que l'emploi des machines à vapeur motrices, pour faire mouvoir les convois de wagons sur les chemins de fer, exige que ces chemins ne présentent pas de trop fortes pentes. D'ailleurs, les pentes un peu fortes feraient disparaître les grands avantages qu'on trouve dans l'emploi des chemins de fer. Aussi les construit-on horizontalement, ou presque horizontalement, et ce n'est que dans des circonstances exceptionnelles qu'on y introduit des pentes prononcées. Il résulte de là qu'on est obligé de faire des déblais et des remblais, suivant que la surface du sol s'élève au-dessus du niveau qu'on veut donner à la voie, ou s'abaisse au-dessous de ce niveau : et lorsque ces différences de niveau sont trop fortes, on construit des tunnels ou des viaducs.

§ 487. Il serait d'une très grande importance qu'on pût éviter de faire des courbes de petit rayon dans le tracé des chemins de fer ; cela permettrait de se détourner, pour éviter de traverser des montagnes ou des vallées, et pour se maintenir toujours à peu de distance de la surface du sol : de cette manière, les travaux de construction du chemin seraient beaucoup simplifiés, et il en résulterait une grande économie. Divers moyens ont été proposés pour atteindre ce but ; nous n'en indiquerons qu'un seul, celui qui a été imaginé par M. Arnoux, et qui a reçu son application sur le chemin de fer de Paris à Sceaux.

Sous avons vu que c'était surtout la fixité des roues aux essieux faisait exclure les courbes de petit rayon, à cause du frottement qui se développe nécessairement dans le parcours de pareilles courbes, en raison de la différence de longueur des deux rails. M. Arnoux a d'abord rendu aux roues leur mobilité autour des extrémités des essieux : en sorte que les roues d'un même essieu tournent indépendamment l'une de l'autre, et chacune d'elles peut tourner de la quantité convenable, d'après la longueur du chemin qu'elle parcourt, pour ne pas glisser sur le rail.

Mais cela ne suffit pas. Pour que le roulement des roues s'effectue librement, et que leurs boudins ne frottent pas contre les rebords des rails, il faut que le plan de chaque roue passe, à chaque instant, par la tangente au rail menée au point où cette roue le touche. Il faut donc que l'essieu de cette roue soit dirigé perpendiculairement au rail, c'est-à-dire à la voie. Il en résulte que les deux essieux d'un même wagon ne doivent pas rester parallèles, lorsque le wagon s'engage dans une partie courbe du chemin : ils doivent être dirigés suivant deux rayons du cercle dont cette courbe est une portion, et par conséquent, ils doivent converger vers le centre de ce cercle. En conséquence M. Arnoux a rendu tous les essieux mobiles autour de chevilles ouvrières, comme le sont les essieux de devant des voitures ordinaires à quatre roues, et il a adopté les dispositions suivantes, pour que chaque essieu, tournant autour de sa cheville ouvrière, se place toujours perpendiculairement à la direction de la voie.

Le premier essieu AA d'un convoi, *fig. 254*, qu'il appartienne à une locomotive ou à un wagon, peu importe, est dirigé par quatre petites roues ou galets B, B, au nombre de quatre, dont les axes sont portés par des chapes fixées à l'essieu lui-même. Ces galets s'appuient sur le côté intérieur de chacun des deux rails, et les boudins dont ils sont garnis s'engagent sous les rebords de ces rails, comme le montre la *fig. 255*. D'après cette disposition, dans quelque sens que la voie tourne, les galets B, B amènent toujours l'essieu AA à être perpendiculaire à sa direction. Le dernier essieu du convoi est dirigé exactement de la même manière.

Voici maintenant en quoi consiste le moyen qui est employé pour diriger tous les essieux intermédiaires. Les wagons, au lieu d'être attachés les uns aux autres par des chaînes à ressorts, comme sur les chemins de fer ordinaires, sont réunis par des barres rigides, ou *timons*, aboutissant aux chevilles ouvrières, autour desquelles ces barres peuvent tourner librement. Ainsi, à la suite de la *traverse CC*, qui réunit les deux chevilles ouvrières du premier

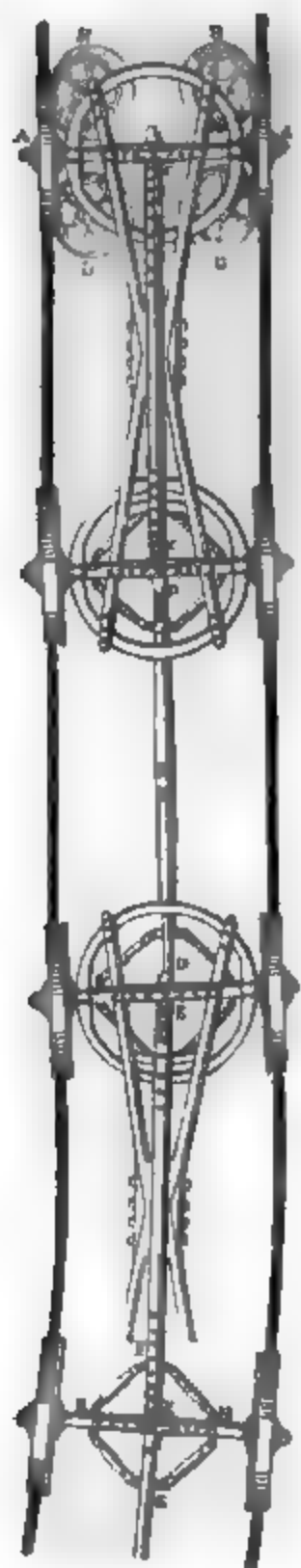


Fig. 254.

wagon, fig. 254, se trouve un li
reliant la seconde cheville ou
premier wagon à la première de
wagon ; de même, à la suite de l
EE du second wagon, se trouve



Fig. 255.

mon EG servant à relier le second
au troisième, et ainsi de suite. Il
de cette disposition que les flèche
timons, dont les longueurs sont les
forment un polygone à côtés égaux
pour sommets les diverses chev
vrières ; et puisque ces sommets
vent toujours sur la ligne courbe q
comme l'axe de la voie de fer, le p
dont il s'agit est inscrit dans ce
courbe. On comprend dès lors q
amener chaque essieu à être di
pendiculairement à la voie, il
l'obliger à faire toujours des angl
avec la flèche et le timon qui ab
à son milieu. On y parvient au m
quatre barres de même longueu
lées, d'une part en F et G à la
au timon, et d'une autre part e
à deux manchons qui enveloppen
et qui peuvent l'un et l'autre glis
certaine quantité dans le sens d
gueur. Le losange FHGK, dont
tre barres sont les côtés, est d
ceptible de se déformer ; et il se
en effet lorsque la flèche et le ti
portent les sommets F, G, vi
changer de direction l'un par r
l'autre. Alors les manchons H, K

long de l'essieu, et le font mouvoir en même temps autour de la ville ouvrière, de manière à le placer toujours suivant la diagonale HK du losange. On conçoit d'après cela que, quel que soit l'angle de la flèche avec le timon, l'essieu sera toujours également incliné sur chacun d'eux, et que par conséquent il ne cessera pas d'être dirigé perpendiculairement à la voie.

Cette dernière disposition, relative aux essieux intermédiaires, n'est pas celle que M. Arnoux avait imaginée tout d'abord, et qu'il appliquée à la construction des wagons de chemin de fer de Paris et de Sceaux. Par sa simplicité, elle est de beaucoup préférable à la disposition primitive, que nous ne décrirons pas. L'idée de cette amélioration lui a été suggérée par un de ses fils.

Un convoi d'une longueur quelconque, dont les wagons sont construits d'après le système de M. Arnoux, peut s'engager dans des parties courbes ou sinueuses d'un chemin de fer, où la courbure de la voie peut changer assez rapidement, sans que les essieux cessent d'être perpendiculaires à la voie. La facilité avec laquelle le convoi se replie suivant tous les contours du chemin fait qu'on désigne souvent le système de M. Arnoux sous le nom de *système de wagons articulés*.

§ 188. Il arrive souvent qu'une voie de fer se bifurque, c'est-à-dire qu'elle donne naissance à deux voies distinctes, qui s'écartent l'une de l'autre, et dont chacune peut être regardée comme le prolongement de la première. Lorsqu'un convoi de wagons marche de la voie unique vers cette double voie, il faut qu'on puisse le faire entrer à volonté sur l'une ou sur l'autre des deux nouvelles voies. On y parvient à l'aide des *aiguilles*, dont nous allons donner la description, et qui sont représentées par la *fig. 256*.

Cette figure est disposée de manière qu'un convoi, arrivant par la partie inférieure, suivra les rails AA, BB. Les rails A' et B' forment le commencement de la seconde voie, dans laquelle le convoi ne peut nullement s'engager. Deux bouts de rails CD, EF, qui sont amincis à leurs extrémités D, F, peuvent tourner autour de leurs autres extrémités C, E; c'est ce que l'on nomme les *aiguilles*. Une tige de fer G, attachée à l'aiguille EF, est destinée à tirer cette aiguille, de manière à appliquer son extrémité F contre le rail BB, en la faisant tourner autour du point E; en même temps une seconde tige de fer H, attachée à l'aiguille EF, entraîne l'autre aiguille CD, pour la détacher du rail contre lequel elle est appuyée. Alors le convoi, arrivant toujours par la partie inférieure de la figure, ne suit plus la même voie que tout à l'heure, et s'engage sur les rails A' et B'. Il suffit donc de tirer la tige de fer G, ou de la pousser, dans le sens de sa longueur, pour que le convoi s'avance sur l'une ou l'autre

280 NOTIONS GÉNÉRALES SUR LE TRANSPORT DES FARDEAUX

des deux nouvelles voies qui font suite à celle par laquelle il est arrivé. Le contre-rail K est destiné à prévenir le déraillement, au moment où les roues des wagons viennent passer sur les aiguilles.

On agit sur la tige de fer G, à l'aide du levier LNM, *fig. 257*, dont le point fixe est en M. En relevant l'extrémité L de ce levier, on tire la tige de fer G, qui est articulée en N; en la rabaissant ensuite, pour lui rendre la position qu'indique la *fig. 257*, les aiguilles reprennent leur position primitive, c'est-à-dire celle que montre la *fig. 256*. La masse de fonte qui est adaptée au levier, tout près de la poignée L qui le termine, est destinée à maintenir les aiguilles dans

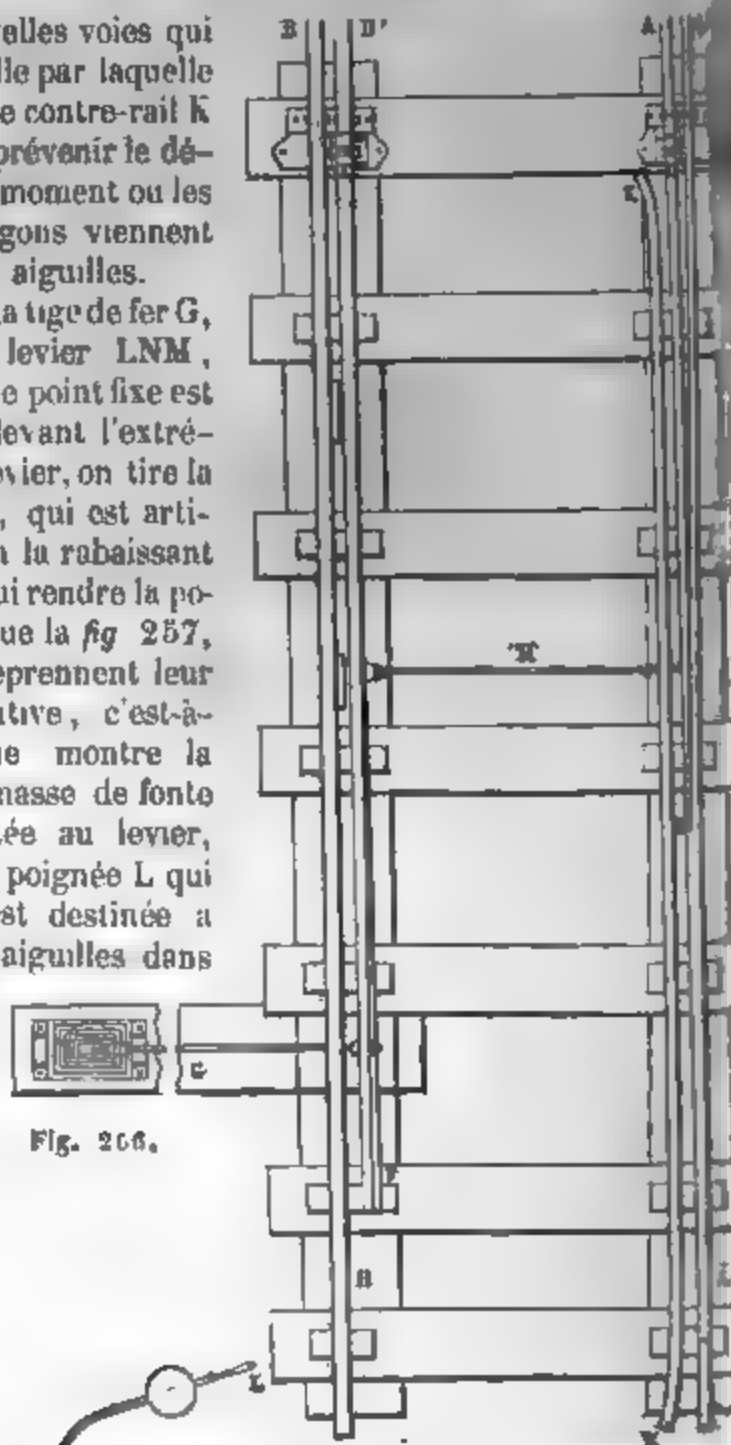


Fig. 256.



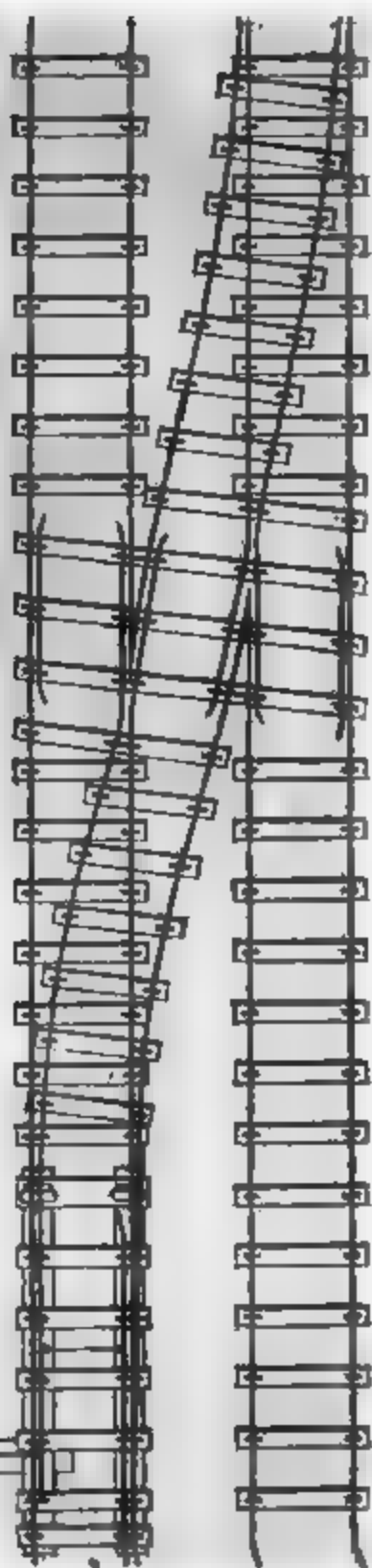
Fig. 257.

ion, sans qu'on ait besoin de s'en occuper; on ne doit agir
er, et par suite sur les aiguil-
es les circonstances acciden-
on veut que le convoi passe
de A', B'.

deux voies parallèles exis-
à l'une de l'autre, et qu'on
besoin de faire passer les
e l'une à l'autre, on les
une troisième voie qui vient
der avec chacune d'elles.
On dispose, aux deux points
lement, des aiguilles à l'aide
on peut engager les convois
e voie accessoire, pour les
r de l'une des deux voies
e sur l'autre. D'ailleurs les
di servent à manœuvrer ces
sont munis de contre-poids,
s'entretiennent dans une position
e les deux voies principales
ns les mêmes conditions que
accessoire n'existait pas.

Dans les gares, on a besoin
e faire passer des wagons
e sur une autre, et l'on ne
disposer de tout l'espace que
une voie de raccordement,
celle que nous venons d'in-
dors on se sert de plaques
s. La fig. 259 représente
es plaques, toute de fonte,
sur sa surface deux portions
le fer, dirigées à angle droit
l'autre. Cette plaque est
en un point d'une voie prin-
e telle manière, qu'une des
tions de voie qu'elle porte
ie de cette voie prin-
ne voie accessoire,
ulaire à la première,
e avec la seconde por-

Fig. 258.



262 NOTIONS GÉNÉRALES SUR LE TRANSPORT DES VAREUSES
 tion de voie que porte la plaque. Lorsqu'un wagon, circulant
 voie principale, a été amené sur la plaque, on la fait tourner
 angle droit, autour d'un axe vertical qui passe par son centre;
 il suffit de faire marcher le wagon, pour qu'il s'engage éga-

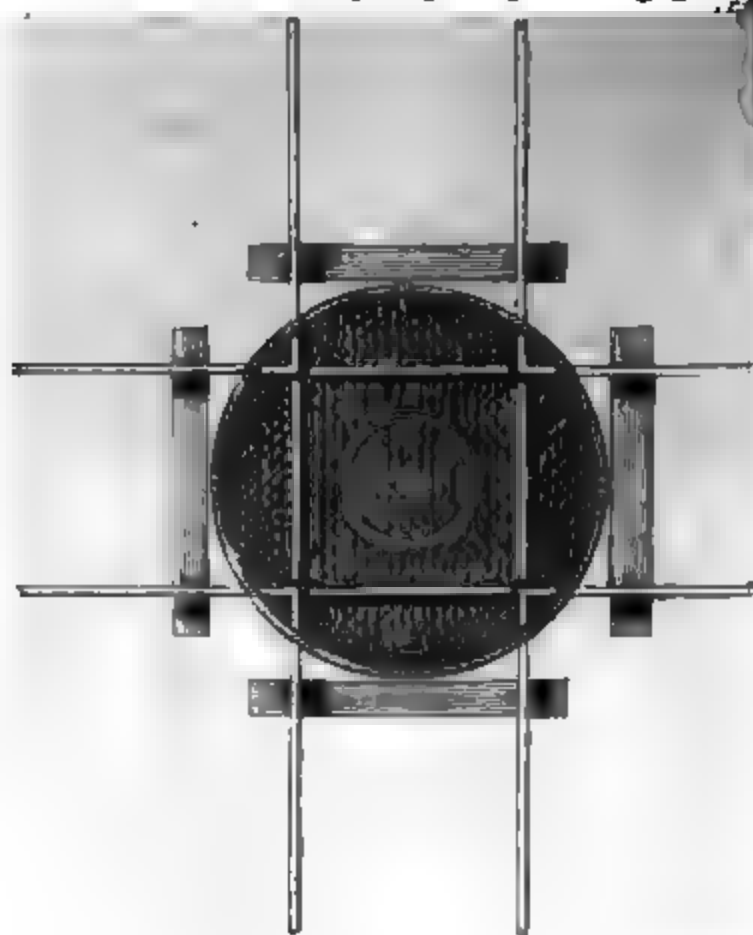


Fig. 259.

voie transversale. On peut ainsi conduire ce wagon dans
 parties de la gare, auxquelles aboutit la voie accessoire;
 l'amener sur une seconde plaque tournante, à l'aide de
 on l'installera sur une seconde voie principale parallèle à la p

La fig. 260 montre les galets qu'on place au-dessous des
 tournantes, pour les soutenir, et s'opposer aux frottement
 déraisonnables qui se produiraient sans leur présence, pendant
 rait tourner ces plaques avec la charge qu'elles supportent.
 galets, en forme de troncs de cône, sont adaptés à une mo-
 dépendante de la plaque, et formée de tiges de fer qui res-
 tout autour d'un collier central; la plaque les entraîne
 mouvement, en les faisant rouler: mais ils ne marchent p-
 vite qu'elle, et ne font qu'un tour autour de son axe, pendant

ls se comportent comme les rouleaux dont nous avons
184.

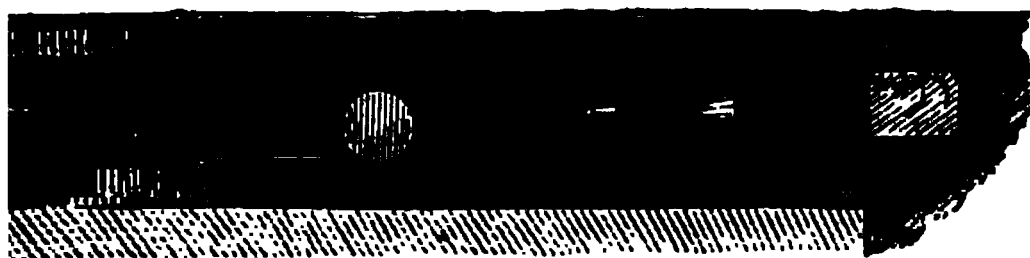


Fig. 260.

mploie généralement comme moteurs, pour faire mou-
s sur les chemins de fer, des machines à vapeur loco-
l'on nomme par abréviation des *locomotives*. Nous
ard quelle est la disposition de ces machines ; pour lo
devons nous contenter de savoir qu'une locomotive
e à vapeur montée sur des roues, et que l'action de
xclusivement employée à faire tourner un des essieux
lent à ces roues. Une locomotive est ordinairement
six roues, et a par conséquent trois essieux. C'est
ilieu qui reçoit un mouvement de rotation de la ma-
ques qui sont fixées à ses deux extrémités participent
nt ; quant aux quatre autres roues, elles servent sim-
tenir la machine, et à la maintenir sur la voie de fer,
le est en mouvement.

qu'une locomotive, placée sur une voie de fer, y soit
s obstacles qui l'empêchent d'avancer. Lorsqu'on fera
, l'essieu du milieu tournera, avec les deux roues qui
et que l'on nomme les *roues motrices* ; ces roues glis-
rails, et il en résultera un frottement d'autant plus
ression qu'elles exercent sur les rails sera plus forte.
e était libre d'avancer, ce frottement ne se produirait
; motrices rouleraient au lieu de glisser, et entraîne-
es toute la machine. Pour que la locomotive reste im-
donc qu'elle soit soumise à une force résistante égale
que cette immobilité détermine. Une résistance infé-
ttement, étant appliquée à la locomotive, ne suffira pas
et sera par conséquent vaincue par elle. Il résulte de là
tive est capable d'exercer une force de traction égale à
ement que ses roues motrices exerceraient sur les rails,
on l'empêcherait d'avancer ; et toutes les fois qu'elle
ête d'un convoi de wagons, pour lequel cette force
a suffisante, elle l'entraînera dans son mouvement.

284 NOTIONS GÉNÉRALES SUR LE TRANSPORT DES FAIM

La puissance d'une locomotive dépend donc essentiellement de la pression que ses roues motrices exercent sur le chemin. Il faut qu'il soit disposé de manière que la machine puisse y développer toute la force nécessaire à la traction. La locomotive doit exercer ; mais cette force ne peut se transmettre au convoi que par l'adhérence des roues motrices avec les rails. Une machine à vapeur pourrait avoir une très grande force, et n'est capable d'exercer qu'une médiocre traction, si les roues n'exerçaient qu'une faible pression sur les rails.

Nous avons vu (§ 43) que, lorsqu'un corps pesant s'appuie sur un plan horizontal par plus de trois points, les pressions qu'il exerce en ses divers points d'appui ne dépendent pas seulement de son poids et de la place qu'occupe son centre de gravité par rapport à ces points : ces pressions dépendent aussi de la flexibilité du corps, et de la rigidité des points d'appui. La flexibilité est moins grande des diverses parties du corps, ainsi que de la rigidité du plan sur lequel il s'appuie. C'est ce qui arrive pour une locomotive, dont six roues supportent toute la machine par l'intermédiaire de la suspension ; la pression exercée par une de ces roues sur le rail est d'autant plus grande, que le ressort qui lui correspond est plus fort. Aussi donne-t-on une grande force aux ressorts des roues motrices, afin de leur faire supporter à elles deux une grande partie du poids total de la locomotive. D'un autre côté, on dispose la machine de manière qu'elle ait un poids considérable. On arrive ainsi à déterminer une grande adhérence des roues motrices sur les rails, c'est-à-dire à permettre à la locomotive d'exercer une grande force de traction. On peut évaluer à environ 20 tonnes le poids d'une locomotive, telle qu'on les construit maintenant.

Pour augmenter la puissance de traction d'une locomotive, on couple souvent les roues motrices à deux des quatre autres roues, à toutes les quatre. à l'aide de bielles qui sont articulées aux rayons de ces roues, fig. 264. Les roues, ainsi réunies par des bielles, prennent le nom de *roues couplées*. A l'aide de cette disposition, les roues motrices ne peuvent pas tourner, sans faire tourner aussi celles auxquelles elles sont liées ; et ce n'est plus l'adhérence des roues motrices sur les rails qui détermine la force de traction ne peut pas dépasser ; mais c'est l'adhérence de ces roues et de celles qu'elles entraînent nécessairement. Il est aisé de reconnaître que des roues ne peuvent être couplées qu'autant qu'elles ont le même diamètre, puisqu'elles doivent faire le même nombre de tours dans un même temps.

des d'une locomotive sont couplées, et que son poids en kilogrammes, on pourra compter qu'elle sera capable

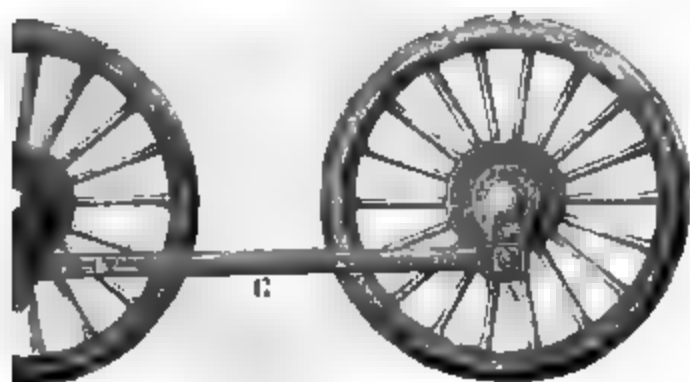


Fig. 261.

orce de traction de 2 500 kilogrammes; car le rapport à la pression, dans le glissement de fer sur fer, descend au-dessous de 0,4. En admettant donc que appliquées à un convoi de wagons, dont les essieux sont graissés, et pour lesquels le tirage ne soit que le poids (§ 184), on voit que la locomotive sera capable, sur un chemin de fer horizontal, un convoi pesant 625 tonnes.

Chemins de fer sont rarement horizontaux dans une vallée; ils sont formés ordinairement d'une suite de parties séparées par des parties inclinées, les unes dans une direction, les autres en sens contraire. Les convois ont donc souvent à monter ou à descendre; aussi les locomotives ne peuvent-elles pas exercer une force si énorme que celui que nous venons de trouver, car on de la pesanteur qui, dans les montées, absorbe une partie de la force de traction qu'elles sont capables d'exercer. En effet, lorsque le tirage d'un convoi augmente, lorsqu'il passe de la partie horizontale du chemin sur une partie montante, la force de traction que la locomotive peut exercer diminue. En effet, sur une partie inclinée, son poids se décompose en deux forces, l'une parallèle au chemin, et l'autre lui est perpendiculaire. La force de traction des roues motrices sur les rails est déterminée par cette dernière seule, et est, par conséquent, plus faible que lorsque le chemin est horizontal; et, en outre, lorsque la locomotive est sur une partie inclinée, on de cette adhérence est employée à vaincre l'autre partie de son poids. Aussi la puissance de traction d'une locomotive diminue-t-elle assez rapidement, à mesure que l'incli-

sur une voie de fer inclinée, et que l'action de la pesanteur ne fasse pas descendre, en faisant glisser ses roues sur les rails, on peut être certain qu'elle montera, lorsque ses roues, rendues mobiles, seront mises en mouvement dans un sens convenable, sous l'action de la vapeur. Or, pour que la locomotive, avec ses roues, ne glisse pas sur ce plan incliné, sous l'action de la pesanteur, il faut que le rapport de la hauteur du plan incliné à sa base (§ 60) ne soit pas plus grand que le rapport du frottement à la pression normale au glissement de fer sur fer. Si le premier rapport est égal au second, la locomotive pourra monter, mais elle ne sera capable d'exercer aucune force de traction sur d'autres corps ; si le premier rapport est plus petit que le second, elle pourra exercer une force de traction d'autant plus grande que la différence entre ces deux rapports sera elle-même plus grande.

La partie du chemin de fer de Paris à Saint-Germain, qui monte vers cette dernière ville, présente une rampe dont l'inclinaison est de 0^m,035 par mètre, et qui a été construite pour conduire les voyageurs presque au niveau du sol de la ville, à l'aide du système atmosphérique dont nous parlerons plus tard. Les convois ne sont pas remorqués sur cette rampe par des locomotives ; cependant les trains peuvent les remonter encore avec une assez forte charge.

§ 492. Un des grands avantages des chemins de fer est leur rapidité. Les chemins ordinaires consistent dans le maniement

rapidité supérieure à une certaine limite, il suffirait d'augmenter le diamètre de ces roues, pour que la rapidité du mouvement pût devenir aussi grande qu'on voudrait, puisque, pour un tour de l'essieu, le convoi avance d'une quantité égale à la circonférence des roues motrices. La vitesse des convois circulent sur les chemins de fer, en France, est de 40 kilomètres par heure; en y comprenant les temps d'arrêt aux stations, on doit compter sur une vitesse moyenne d'environ 30 kilomètres par heure.

Pour arrêter les convois en mouvement, on arrête l'action du moteur, et l'on se sert de freins, à l'aide desquels on augmente les résistances passives. Ces freins sont disposés autrement que les freins ordinaires, mais ils agissent d'une manière analogue en produisant un frottement sur le contour des roues. Ce sont deux morceaux de bois, placés entre deux roues d'un essieu, *fig* 262, et taillés de manière à embrasser une por-

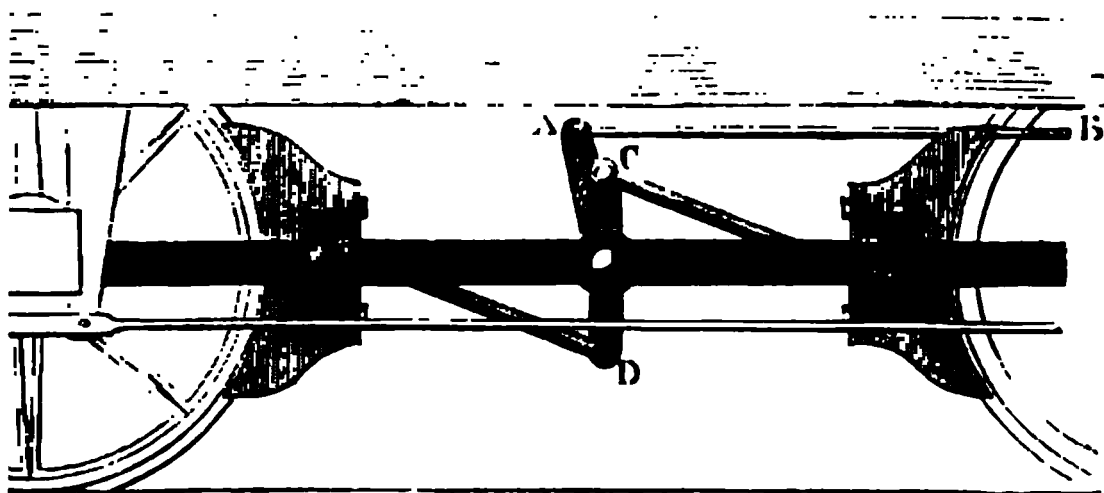


Fig. 262.

tion du contour de chacune de ces roues. Une tringle AB est disposée de manière à agir sur le levier CD, mobile autour de l'axe E. La tringle AB est articulée, en A, à un bras de levier fixé à cet axe; en poussant cette tringle de A vers B, on appuie les deux morceaux de bois contre les roues, par l'intermédiaire de tiges de fer qui sont articulées d'une part aux deux extrémités du levier CD, et d'autre part à ces deux morceaux de bois.

Ce genre de frein, qui est généralement adopté, offre le même inconvénient que le frein des voitures ordinaires. Lorsqu'on le serre trop, pour empêcher les roues de tourner, elles glissent sur les rails, s'usent en un seul point de leur contour, et deviennent irrégulières. Pour obvier à cet inconvénient, M. Laignel a proposé

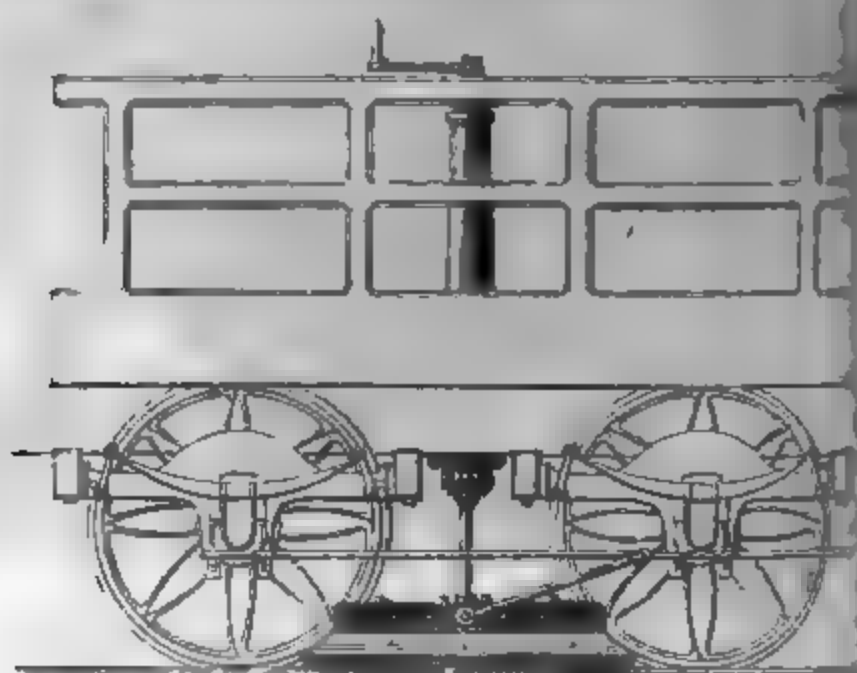


Fig. 203.

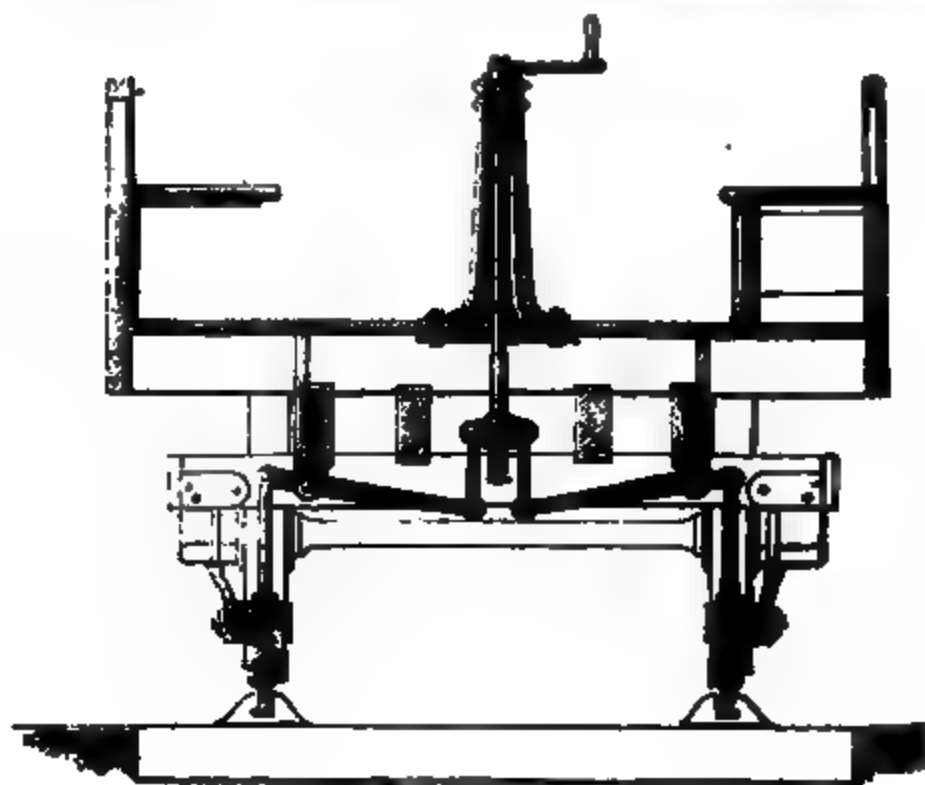


Fig. 204.

le frein ordinaire par celui que représentent les fig. 264. Ce frein consiste en deux espèces de patins, qui sont placés aux deux côtés d'un wagon, entre les roues qui les supportent habituellement suspendus entre ces roues, auxquels, sans qu'ils les touchent en aucune manière. Lorsque l'on veut faire agir le frein, on fait tourner une manivelle qui agit sur une vis : l'écrrou, qui est engagé dans cette vis, s'élève, et en même temps les deux patins, par l'intermédiaire de la fig. 264. Ces patins viennent alors s'appuyer sur les rails, et plus fortement qu'on a fait tourner davantage la manivelle, en résulte un frottement qui tend à ralentir la marche du wagon. Le frottement qui se développe ainsi peut devenir presque aussi intense que celui qui se produit lorsqu'on empêche les roues de tourner, à l'aide du frein ordinaire ; il suffit pour cela d'ajouter aux deux patins, de manière à leur faire supporter presque tout le poids du wagon. Les patins sont munis inférieurement d'une lamelle de fer, qui présente un rebord analogue aux boudins des roues, pour éviter le déraillement au moment où l'on manœuvre le frein. Ce frein a été employé avec avantage sur plusieurs chemins de fer, et notamment sur les plans inclinés de Liège.

La résistance qui s'oppose au roulement des wagons sur les rails est une si petite fraction de leur poids, que l'inclinaison du chemin n'a pas besoin d'être bien grande, pour qu'ils puissent descendre le long de ce chemin sous la seule action de leur poids. Il suffit, en effet, qu'il suffise pour cela que la composante du poids parallèlement au chemin, soit capable de vaincre les résistances passives qui s'opposent au mouvement (§ 185). Aussi, il est rare de trouver, sur les chemins de fer, des endroits où la résistance à être bien forte, est assez prononcée pour que le mouvement des convois puisse se continuer sans qu'on fasse agir la machine. On est même quelquefois obligé, en pareil cas, de s'arrêter, pour empêcher la vitesse de devenir trop grande.

Un exemple remarquable, la portion du chemin de Saint-Étienne à Lyon, qui est comprise entre la première et la deuxième gare ; les wagons parcourent toute cette portion du chemin, sans que la longueur est de plus de 36 kilomètres, en vertu de la grande inclinaison de la pesanteur, et par conséquent sans qu'on ait besoin de locomotives en tête des convois. La pente est de 1 mètre par mètre de Saint-Étienne à Rive-de-Gier, et seulement de 1/2 mètre par mètre de Rive-de-Gier à Givors. Pendant ce parcours, on sert constamment des freins pour modérer la vitesse des

descente des wagons chargés pour remonter les wagons vides. Pour cela, on attache deux wagons aux deux extrémités d'une corde. On fait passer dans la gorge d'une grande poulie fixe installée au haut du plan incliné, *fig.* 265 et 266. Les deux bouts de cette corde, en quittant la poulie, se dirigent suivant deux voies de fer parallèles, sur lesquelles doivent se déplacer les deux wagons. La pesanteur, en agissant sur les deux wagons, tend à faire descendre chacun d'eux le long de la voie inclinée dans laquelle il est posé : mais la corde qui les réunit s'oppose à ce mouvement en soit ainsi. Décomposons les poids des deux wagons, comme nous l'avons déjà fait plusieurs fois, en leurs composantes parallèles et perpendiculaires au chemin. Les premières, celles qui sont parallèles au chemin, agissent aux deux extrémités de la corde. Ce sont ces forces qu'il faut considérer, pour savoir s'il y a mouvement libre ou mouvement, et, dans ce dernier cas, quel sera le mouvement. Si les wagons étaient également pesants, les composantes seraient égales, et la corde resterait immobile. Mais, si l'un des wagons est chargé et l'autre vide, la composante du poids du premier l'emportera sur celle du poids du second : le wagon chargé descendra et fera remonter le wagon vide.

Le mouvement ainsi produit est tout à fait analogue à celui que nous avons observé dans la machine d'Atwood (§ 84) : la vitesse augmenterait donc constamment, si l'on n'avait soin de la



Fig. 265.

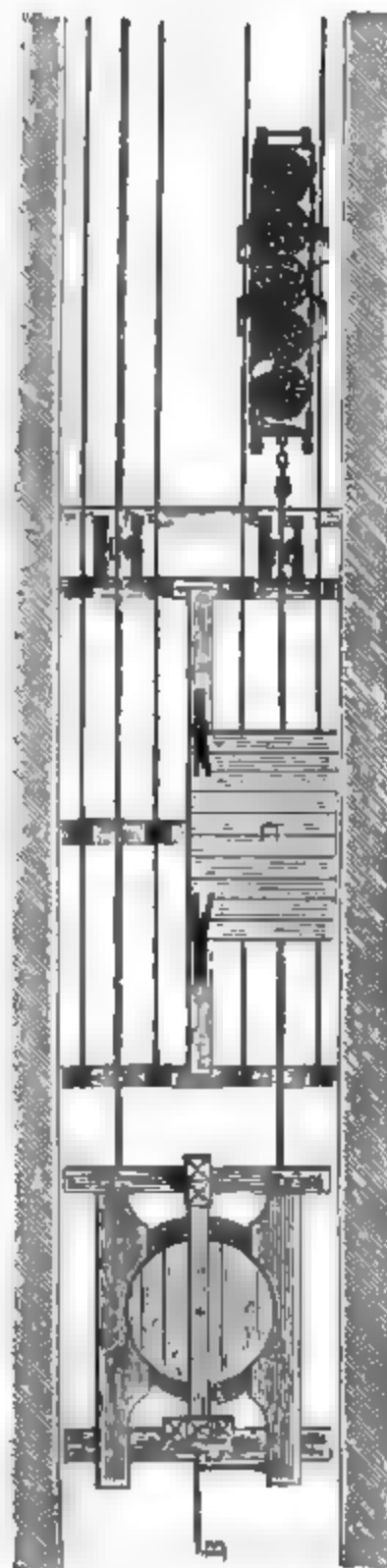


Fig. 266. (Échelle de 0 millimètres pour mètre.)

il y être facilement maintenu, pendant qu'on le charge. Lors-

qu'il est chargé, et que l'autre a été vidé au bas du plan incliné, il suffit de pousser un peu le premier, pour commencer le mouvement, et il continue de lui-même. On voit sur les *fig. 265 et 266* un plancher D, qu'on peut faire tourner autour d'un de ses côtés, et qu'on peut ainsi placer à volonté au-dessus de l'une ou l'autre des deux voies : ce plancher mobile est destiné à faciliter le chargement des wagons.

Un plan incliné, disposé comme celui que nous venons de décrire, prend le nom de *plan incliné automoteur*. Celui qui est figuré ici existe dans une mine de houille des environs de Saint-Étienne.

§ 196. **Drops.** — On a imaginé, en Angleterre, un appareil nommé *drop*, qui sert au chargement des navires, et qui a de l'analogie avec les plans inclinés automoteurs ; la seule action de la pesanteur fait descendre les wagons chargés, et remonter les wagons vides. Voici quelle est la disposition de cet appareil.

Une voie de fer, soutenue par une charpente, *fig. 267*, s'avance sur le bord du quai où doit s'opérer le chargement du navire. Une sorte de plateau de balance B est suspendu à l'extrémité supérieure d'un cadre de bois, qui peut tourner à charnière autour de son côté inférieur. Lorsque ce cadre mobile est relevé, le plateau qu'il supporte vient se placer dans le prolongement de la voie de fer : en sorte que chaque wagon peut passer très facilement de cette voie sur le plateau. Si le cadre mobile s'abaisse, en tournant autour de la charnière qui le termine inférieurement, le plateau vient se poser sur le pont du navire, qu'on a convenablement placé pour cela. La partie supérieure du cadre mobile est retenue par un câble G, qui s'enroule sur un arbre C : aux deux extrémités de cet arbre, de part et d'autre de la voie de fer, s'enroulent, en sens contraire, deux câbles F, qui supportent inférieurement deux contre-poids D. Ces contre-poids ne sont pas simplement suspendus aux câbles F, mais ils sont encore attachés à des tringles de bois E, mobiles autour de leurs extrémités supérieures.

Lorsque le plateau B est placé dans le prolongement de la voie de fer, et qu'on amène un wagon chargé sur ce plateau, le poids du wagon le fait descendre, en abaissant le cadre mobile. Le câble G se déroule sur l'arbre C, auquel il communique un mouvement de rotation ; ce mouvement fait enrouler les câbles F, et monter les contre-poids D. Aussitôt que le wagon, porté ainsi sur le pont du navire, y a été déchargé, il ne se trouve plus assez pesant pour faire équilibre aux contre-poids D ; ceux-ci redescendent : les câbles F font tourner l'arbre C en sens contraire, en se déroulant : le câble G s'enroule sur cet arbre, et relève ainsi le cadre mobile, avec le pla-

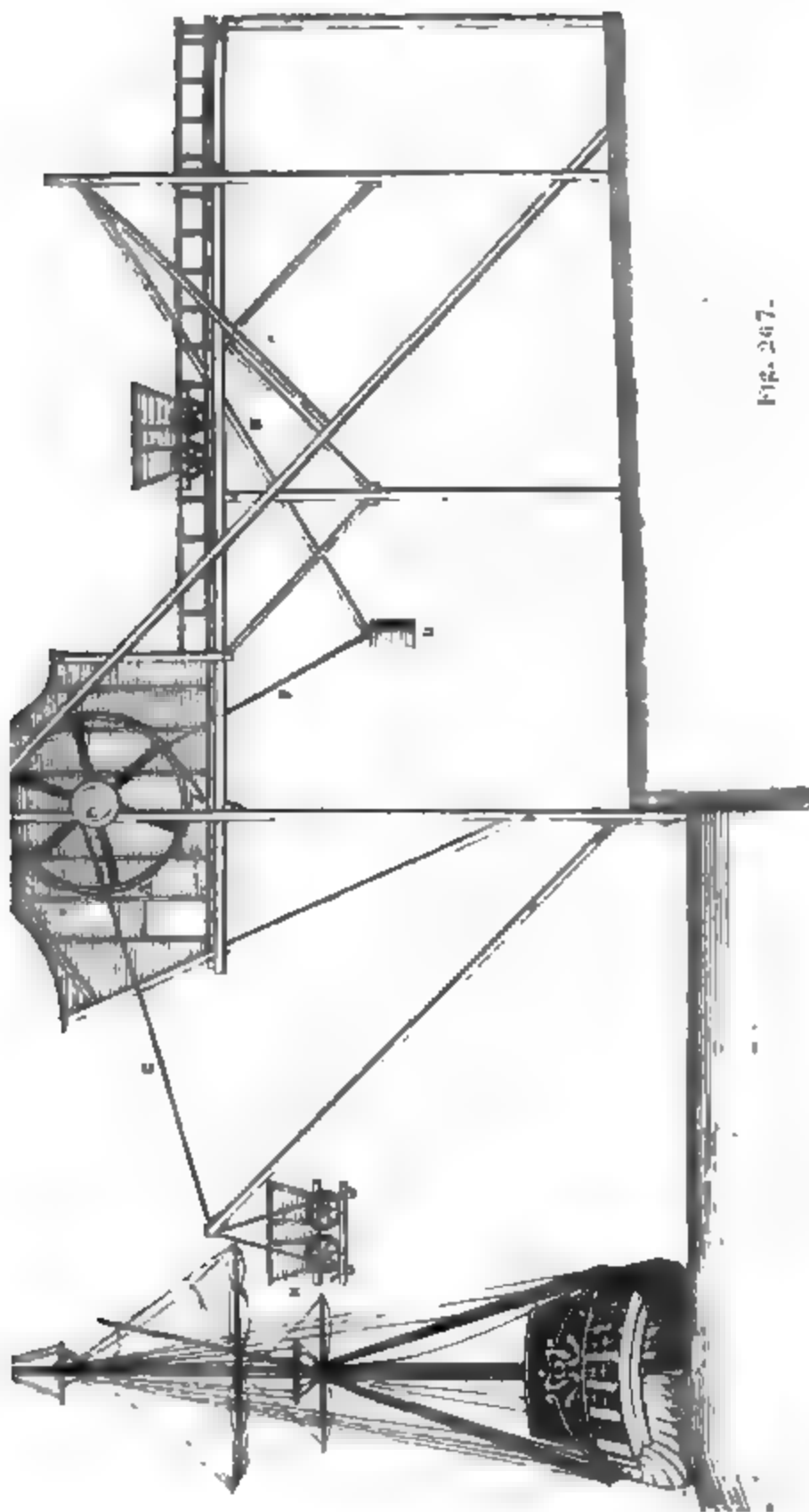


Fig. 267.

294 CONSIDÉRATIONS GÉNÉRALES SUR LES MOTEURS.

teau et le wagon vide. On emmène ce wagon, pour le remplir par un autre plein, et la manœuvre recommence.

Les tringles E, auxquelles les contre-poids D sont attachés, sont destinées à faire varier la tension que ces contre-poids communiquent aux câbles F. Par cette disposition, la tension des câbles F est d'autant plus grande, que l'axe de rotation du cadre mobile est plus éloigné de la verticale qui passe par le centre de gravité du wagon placé sur le plateau. On n'a pas cherché par là à établir un équilibre entre le poids du wagon et les contre-poids; cet équilibre ne peut pas avoir lieu, puisqu'il faut que le poids du wagon chargé l'emporte sur les contre-poids, et qu'au contraire ceux-ci l'emportent sur le poids du wagon vide : mais on a voulu régulariser, jusqu'à un certain point, la grandeur de la force excédante qui produit le mouvement, soit dans un sens, soit dans l'autre.

L'arbre C porte un tambour A, autour duquel est disposé un frein pareil à celui que nous avons décrit dans le paragraphe 144 (page 183). Un ouvrier agit sur ce frein, à l'aide d'un levier qui est ponctué sur la figure, et empêche ainsi la vitesse du wagon de devenir trop grande, soit lorsqu'il descend, soit lorsqu'il remonte.

CONSIDÉRATIONS GÉNÉRALES SUR LES MOTEURS.

§ 197. D'après ce que nous avons vu, une machine ne peut mettre en mouvement, et effectuer du travail utile, qu'autant qu'elle est soumise à l'action d'une puissance. Tout ce qui est capable d'exercer cette puissance s'appelle, en général, un *moteur*. Il y a divers espèces de moteurs, que nous allons indiquer successivement.

1^o L'homme et les animaux sont très souvent employés pour faire mouvoir des machines: on les désigne, dans ce cas, sous le nom de *moteurs animés*.

2^o Les ressorts, tels que ceux qui font marcher les pendules des montres, sont des moteurs. Il est vrai qu'un ressort ne peut agir sur une machine qu'autant qu'il est tendu, et qu'il faut pour cela qu'un autre moteur ait préalablement agi sur lui: mais dès le moment qu'il est tendu, peu importe que sa tension ait été produite par telle ou telle cause: il n'en doit pas moins être considéré comme un moteur capable de faire mouvoir une machine, et de vaincre les résistances qui lui sont appliquées.

3^o On emploie encore, comme moteurs, des corps pesants tombant d'une certaine hauteur. Nous en avons vu des exemples dans les *horloges*, et dans les plans inclinés automoteurs.

1° Les cours d'eau servent de moteurs dans une foule de circonstances : en agissant sur des roues hydrauliques, ils font mouvoir une quantité innombrable de moulins, de forges, de filatures, de scieries, et en général, d'ateliers de toute espèce.

2° Le mouvement de l'air, ou ce que l'on nomme le vent, est utilisé dans les moulins à vent, et forme ainsi un moteur très répandu.

3° La force élastique que la chaleur communique à la vapeur d'eau, en général, aux vapeurs des liquides qui se volatilisent facilement, et même aux gaz, fournit un moteur extrêmement précieux, et de l'usage, encore récent, prend un développement considérable.

4° Un gaz qui a été fortement comprimé peut faire mouvoir une machine en agissant de la même manière qu'un ressort : ce genre de moteur est peu employé.

5° Enfin, l'électricité doit être rangée parmi les moteurs, comme nous le verrons lorsque nous nous occuperons des machines électro-motrices : mais son usage, sous ce point de vue, est jusqu'à présent très restreint.

§ 193. Les divers moteurs qui viennent d'être énumérés ici sont d'avoir le même degré d'importance. Au point de vue de l'industrie, on peut dire qu'il n'y a, en réalité, que quatre moteurs, savoir : 1° les moteurs animés ; 2° les cours d'eau ; 3° le vent ; 4° la vapeur.

Ces moteurs ne peuvent, en général, exercer leur action que par l'intermédiaire d'une machine spéciale, qui n'a d'autre objet que de leur permettre de développer leur puissance, et de la transmettre ensuite aux mécanismes auxquels les résistances sont appliquées. Les machines de ce genre sont désignées sous le nom de machines motrices : telles sont, par exemple, les roues hydrauliques et les machines à vapeur.

L'étude d'un moteur peut être faite sous deux points de vue différents. On peut d'abord considérer le moteur en lui-même, sans s'occuper des moyens d'utiliser son action. On arrive ainsi à se former une idée nette de la quantité totale de travail qu'il est capable d'effectuer dans un temps donné, quantité qui ne peut jamais être dépassée, quelle que soit la disposition de la machine à laquelle il est appliqué. Mais on peut aussi ne pas séparer le moteur de sa machine motrice, et c'est ce qu'on fait habituellement, afin de se rendre compte de la quantité de travail dont on peut réellement disposer par l'emploi de cette machine. En comparant ensuite le résultat ainsi obtenu avec celui qu'on avait trouvé quand on avait considéré le moteur seul, indépendamment de la machine

296 CONSIDÉRATIONS GÉNÉRALES SUR LES MOTEURS.

motrice, on est en mesure de juger du degré de perfection de la machine, d'après la portion plus ou moins grande de la puissance totale du moteur qu'elle aura rendue disponible.

L'étude d'un moteur en lui-même se fera en examinant quelle manière il peut agir, quelle force il est capable de développer à chaque instant, quel chemin parcourt le point d'application de cette force suivant sa direction même. On trouvera ainsi des résultats différents, suivant qu'il s'agira de tel ou tel moteur. Si l'on s'occupe d'une chute d'eau, la connaissance de la hauteur de la chute, et de la quantité d'eau qu'elle fournit en une heure, conduira à la mesure de la puissance de cette chute, puissance qui sera entièrement déterminée. S'il s'agit d'un moteur animé, d'un homme par exemple, on reconnaîtra au contraire que sa puissance est variable: ainsi que nous le verrons bientôt, cette puissance sera plus ou moins grande, suivant que l'homme agira avec ses mains, avec ses pieds, qu'il tirera ou qu'il poussera, qu'il exercera sa force verticalement ou horizontalement. Dans tous les cas, pour arriver à ces divers résultats, il suffira d'employer les moyens qui nous sont déjà connus. On évaluera les forces développées par les hommes pendant leur action, à l'aide de dynamomètres, et l'on déterminera la grandeur du chemin parcouru par le point d'application de l'une d'elles, suivant sa direction, soit en le mesurant directement, soit en ayant recours à des moyens particuliers faciles à imaginer.

Quant à la mesure de la quantité de travail que la machine motrice rend disponible, nous allons voir comment on l'effectue réellement.

§ 199. **Frein dynamométrique.** — Dans la plupart des machines motrices, on fait tourner un arbre, et c'est ce mouvement de rotation qui est ensuite utilisé, pour vaincre des résistances de diverses sortes. C'est ainsi qu'une roue hydraulique reçoit directement l'action de l'eau un mouvement de rotation auquel participe la machine qui la supporte; cet arbre fait ensuite mouvoir des meules, des marteaux, etc. De même, une machine à vapeur qui fonctionne dans un atelier, donne un mouvement de rotation à un arbre horizontal qu'on nomme *arbre de couche*, et c'est sur cet arbre que l'on prend le mouvement qui doit être transmis à ces machines-outils qui doivent effectuer les travaux auxquels l'atelier est destiné. Lorsqu'on veut mesurer la puissance d'une machine motrice, on supprime toute communication de l'arbre qui fait tourner avec les machines-outils, et en général avec les résistances à vaincre; puis on applique à cet arbre une résistance artificielle, que l'on puisse facilement évaluer. En faisant varier

de cette résistance, on peut faire en sorte que le mouvement de la machine soit celui qu'elle prend habituellement, et que elle se trouve exactement dans les mêmes conditions, la manière dont elle reçoit l'action du moteur. Dès lors il est déterminé la quantité de travail développée par la machine pour vaincre cette résistance, et l'on a ainsi la mesure du travail de cette machine effectuée dans les circonstances ordinaires. Pour produire la résistance artificielle dont on vient de parler, on se sert du *frein dynamométrique*, ou *frein de Prony*, du nom de son inventeur. Cet appareil est représenté par la fig. 268. A est

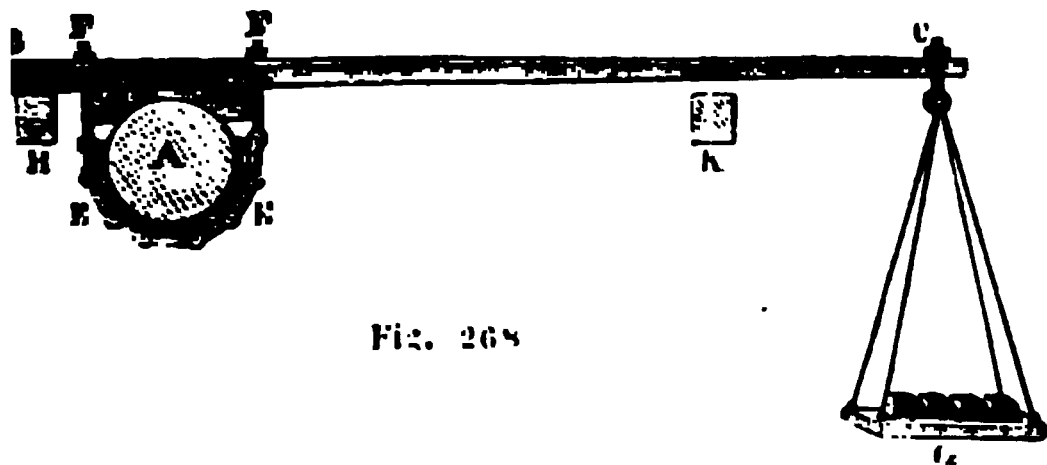


Fig. 268

l'arbre horizontal auquel le frein est appliqué. La surface de cet arbre doit être pour cela exactement cylindrique ; lorsque cela n'a pas lieu, on s'adapte un manchon de fonte, que l'on fixe à l'aide de boulons de telle façon que sa surface ait tous ses points également éloignés de l'axe de rotation, ou, comme on dit, que sa surface soit centrée. Un levier de bois BC est garni d'un morceau de bois dont la face inférieure est taillée de manière à emboîter une partie de la surface de l'arbre, ou du manchon s'il y en a un. Une chaîne EE', formée de plaques de tôle articulées les unes aux autres, est également garnie de petits morceaux de bois, qui viennent se loger sur la partie inférieure de la même surface : cette chaîne est tenue par deux boulons à vis, qui traversent le levier BC, et les extrémités desquels s'engagent deux écrous F, F'. Un poids G, destiné à recevoir des poids, est suspendu à l'extrémité du levier BC. Des arrêts H, K, sont disposés de manière à s'opposer à ce que le levier, en tournant autour de l'arbre, soit dans une position soit dans l'autre, s'écarte trop de la position horizontale où il doit être maintenu.

Supposons que l'arbre A soit mis en mouvement par la machine dont on veut évaluer la puissance, et qu'on serre les écrous de manière à appliquer fortement sur sa surface le mou-

298 CONSIDÉRATIONS GÉNÉRALES SUR LES MOTEURS

ceau de bois D, et ceux que porte la chaîne EE. L'adhérence se développe entre l'arbre et ces espèces de mâchoires tendra à entraîner le levier BC dans le mouvement de rotation de l'arbre: mais l'arrêt H s'y oppose, et en obligeant le levier à rester immobile, il détermine le glissement de l'arbre sur les mâchoires du frein. Le frottement qui résulte de ce glissement est une résistance appliquée à l'arbre, et qui tend à détruire son mouvement. On conçoit qu'on puisse arriver par le tâtonnement à serrer les écrous F, F, de telle manière que la machine produise le même mouvement que lorsqu'elle fonctionne dans les circonstances ordinaires; alors le travail résistant, développé par le frottement du frein sur l'arbre, peut être pris pour la mesure de la quantité de travail que la machine est capable d'effectuer. Restait à évaluer ce travail.

Pour y arriver, on met des poids dans le plateau G, en quantité suffisante pour que le levier BC se maintienne horizontal, et ne soit ni enclin à tourner vers l'arrêt H ni vers l'arrêt K. Dès lors ce levier se trouve libre, sous l'action de ces poids et des forces de frottement que l'arbre exerce aux divers points où il touche les mâchoires du frein. Admettons, pour simplifier le raisonnement, que le frein tout entier, y compris le plateau G, soit négligeable. Soit P le poids total placé dans ce plateau; admettons qu'au lieu de plusieurs forces de frottement appliquées à différents points, il n'y en ait qu'une seule Q, qui agira nécessairement suivant la tangente à la circonférence de l'arbre. Le frein ne peut tourner autour de cet arbre, il faut, pour qu'il soit en équilibre, que les forces P et Q soient inversement proportionnelles à leurs distances respectives à son axe, ou, ce qui revient au même, que les forces soient proportionnelles aux circonférences de cercle dont les rayons sont les distances. Le produit de la force de frottement Q par la circonférence de l'arbre, sera donc égal au produit de la force P, par la circonférence dont le rayon serait la distance de l'axe de l'arbre à la verticale passant par le point C, où est pendu le plateau G. Mais le premier produit n'est autre que le travail développé par la force de frottement Q, pendant un tour entier de l'arbre; le second produit, qui peut être facilement mesuré, pourra donc servir de mesure au même travail. Il suffira de multiplier ce second produit par le nombre de tours que fait l'arbre en une heure, pour avoir la quantité totale de travail que la machine peut effectuer dans cet intervalle de temps.

Il est clair que le résultat auquel nous venons d'arriver est encore le même, si, au lieu d'une seule force de frottement,

1 au frein, il en existe plusieurs appliquées en ses divers
2 de contact avec la surface de l'arbre. Quant au poids du
3 du plateau G, on en tiendra compte aisément, en mesurant,
4 d'un dynamomètre, la force qu'il faut appliquer au point C;
5 lement et de bas en haut, pour soutenir le frein, lorsque les
6 F, F, ne sont pas serrés, et que le plateau ne contient aucun
7 ; on ajoutera cette force au poids placé dans le plateau, avant
8 etuer les calculs indiqués plus haut.

1. On aura serré convenablement les écrous F, F, et chargé en con-
 2. nance le plateau G. de manière que la machine marche comme
 3. linéaire, et que le levier BC se maintienne horizontal, on trou-
 4. de la manière suivante le travail total effectué par la machine
 5. e heure. On comptera les poids mis dans le plateau, et l'on
 6. utera ce qui est nécessaire pour tenir compte du poids du
 7. et du plateau : on multipliera ensuite le poids total ainsi obtenu.
 8. a longueur de la circonférence du cercle qui aurait pour rayon
 9. stance horizontale de l'axe de l'arbre à la verticale passant
 10. e point de suspension du plateau : enfin on multipliera ce pre-
 11. résultat par le nombre de tours que l'arbre fait en une heure.
 12. aura soin d'évaluer en kilogrammes le poids mis dans le pla-
 13. , ainsi que ce qu'on doit lui ajouter : et en mètres la longueur
 14. a circonférence qui doit servir à faire la première multiplica-
 15. . Le résultat du calcul représentera le travail de la machine en
 16. heure, évalué en kilogrammètres (§ 78'.

200. Cheval-vapeur. — Pour indiquer la puissance d'une machine motrice, on dit souvent que cette machine est de la force de 2 chevaux, de 3 chevaux, de 4 chevaux... Voici la signification précise de cette expression. On dit qu'une machine a la force d'un cheval, lorsqu'elle est capable d'élever 75 kilogrammes à 1 mètre de hauteur, dans une seconde de temps. Sa force sera de 2 chevaux, de 3 chevaux, de 4 chevaux..., si elle est capable d'effectuer, dans le même temps, une quantité de travail double, triple, quadruple...; c'est-à-dire si elle peut élever en une seconde de temps, à 1 mètre de hauteur, 2 fois, 3 fois, 4 fois..., 75 kilogrammes.

Il est facile, d'après cela, de calculer la force d'une machine mobile, exprimée en chevaux, quand on a trouvé, à l'aide du frein dynamométrique, la mesure du travail qu'elle effectue en une minute. Supposons, par exemple, que ce travail soit de 1 620 000 kilogrammètres. En une minute la machine produira 60 fois moins, c'est-à-dire 27 000 kilogrammètres : en une seconde, elle produira 60 fois moins, c'est-à-dire 450 kilogrammètres. Cette ma-

chine est donc capable d'élever 450 kilogrammes à 4 mètres de hauteur, en 1 seconde de temps : et comme 450 est égal à 75, on dira que la machine a une force de 6 chevaux.

La quantité de travail qu'un cheval peut effectuer, dans les circonstances ordinaires, est loin d'être aussi grande que celle que nous venons d'indiquer comme correspondant à ce qu'on appelle la force d'un cheval. La représentation de la force d'une machine par un certain nombre de chevaux, est donc de pure convention ; elle ne fait nullement connaître le nombre de chevaux qu'il faut employer pour effectuer le même travail que la machine. Afin pour éviter la confusion, emploie-t-on souvent la dénomination *cheval-vapeur*, pour exprimer la force d'une machine ; au lieu de dire qu'elle a la force de 6 chevaux, on dira qu'elle a la force de 6 chevaux-vapeur. Le mot *vapeur* qu'on ajoute ici au mot *cheval* pour en préciser la signification, vient de ce que cette méthode d'évaluer la force d'une machine motrice a été d'abord employée pour les machines à vapeur. Quelquefois aussi on remplace l'expression de cheval-vapeur par celle de *cheval-dynamique*, qui a la même signification.

§ 201. **Moteurs animés.** — Nous ne pouvons pas donner maintenant des notions suffisantes sur le mode d'action des divers moteurs dont nous avons parlé. Nous nous contenterons donc de nous occuper des moteurs animés, et, à mesure que l'occasion s'en présentera, nous comblerons la lacune que nous allons laisser, relativement aux autres moteurs.

La force de l'homme peut être employée de bien des manières différentes. Il peut pousser ou tirer, soit horizontalement, soit verticalement, en agissant avec ses mains, et sans se déplacer ; étant assis, il peut pousser avec ses pieds ; il peut encore agir en poussant ou tirant, en même temps qu'il marche ; il peut enfin agir par son poids seulement, comme dans les roues à chevilles (§ 57). La quantité de travail qu'il développe dans ces diverses circonstances est loin d'être la même. Il est donc important de savoir de quelle manière sa force doit être employée, pour produire la plus grande quantité possible de travail. Mais, en cherchant à résoudre cette question, on ne doit pas oublier que l'homme se fatigue en travaillant ; si l'on veut lui faire produire une trop grande quantité de travail dans un temps donné, il ne pourra pas travailler aussi longtemps dans sa journée ; si l'on exige trop de lui dans une journée, il résultera une fatigue qui persistera dans les journées suivantes ; c'est ce qu'on doit toujours éviter.

En ne considérant que la grandeur de la force qu'un homme p

pour vaincre une résistance, on reconnaît que cette force est beaucoup, suivant que l'homme agit de telle ou telle manière. On a trouvé que le plus grand effort qu'il puisse produire correspond à celui où il cherche à soulever un poids placé entre ses jambes. Cet effort maximum peut aller à 200, et même 300 kilogrammes, suivant les individus : en moyenne, on peut l'évaluer à 130 kilogrammes. Mais la force développée par l'homme n'est qu'un des éléments du travail qu'il peut effectuer ; pour arriver à des notions exactes sur la grandeur de ce travail, il est nécessaire de tenir compte du chemin que l'homme peut faire parcourir au point d'application de l'effort qu'il exerce. S'il a une très grande résistance à vaincre, il se fatiguera beaucoup en très peu de temps, et ne pourra déplacer le point d'application de cette résistance que d'une petite quantité : si la résistance à vaincre est très faible, il pourra faire parcourir un chemin beaucoup plus grand à son point d'application. Dans le premier de ces deux cas, aussi bien que dans le second, un des éléments du travail effectué pendant une journée aura une petite valeur, et par suite le travail lui-même sera petit. Si, au contraire, la résistance à vaincre n'est ni trop grande ni trop petite, l'homme pourra, dans une journée, déplacer son point d'application d'une quantité notable, et il en résultera une plus grande somme de travail. Un homme ne doit donc pas employer toute sa force, lorsqu'il se livre à un travail continu : il ne doit avoir à exercer à chaque instant qu'une portion de l'effort maximum dont il est capable.

C'est à l'expérience à indiquer la grandeur de la force qu'un homme doit développer, et la vitesse avec laquelle son point d'application doit se déplacer, pour effectuer le plus de travail possible dans une journée, suivant que cette force est appliquée de telle ou telle manière. C'est ainsi qu'on a trouvé que les hommes qui manœuvrent une sonnette à tirade (§ 158), doivent soulever chacun environ 20 kilogrammes du poids du mouton, à 1 mètre de hauteur : ils doivent battre à peu près 20 coups par minute, et 60 à 80 coups par suite : après quoi ils doivent se reposer autant de temps qu'ils ont travaillé. De même on a reconnu que les hommes qui manœuvrent un cabestan doivent exercer chacun une pression de 42 kilogrammes, à l'extrémité du levier sur lequel il agit ; ils doivent, en outre, marcher avec une vitesse de 0^m,6 par seconde. De même encore on a trouvé qu'un homme qui tourne une manivelle, dont le rayon est d'environ 0^m,32, doit exercer sur la poignée une pression de 7 à 8 kilogrammes, et faire faire à la manivelle de 20 à 30 tours par minute. Pour arriver à ce dernier résultat, on emploie une manivelle dynamométrique, dont la poignée A, fig. 269, est

302 CONSIDÉRATIONS GÉNÉRALES SUR LES MOTEURS.

fixée à l'extrémité d'une lame de ressort BC. On adapte la manivelle à l'extrémité de l'arbre qu'on veut faire tourner, et on l'y assujettit à l'aide d'une vis de pression qu'on voit sur la figure. Lors-

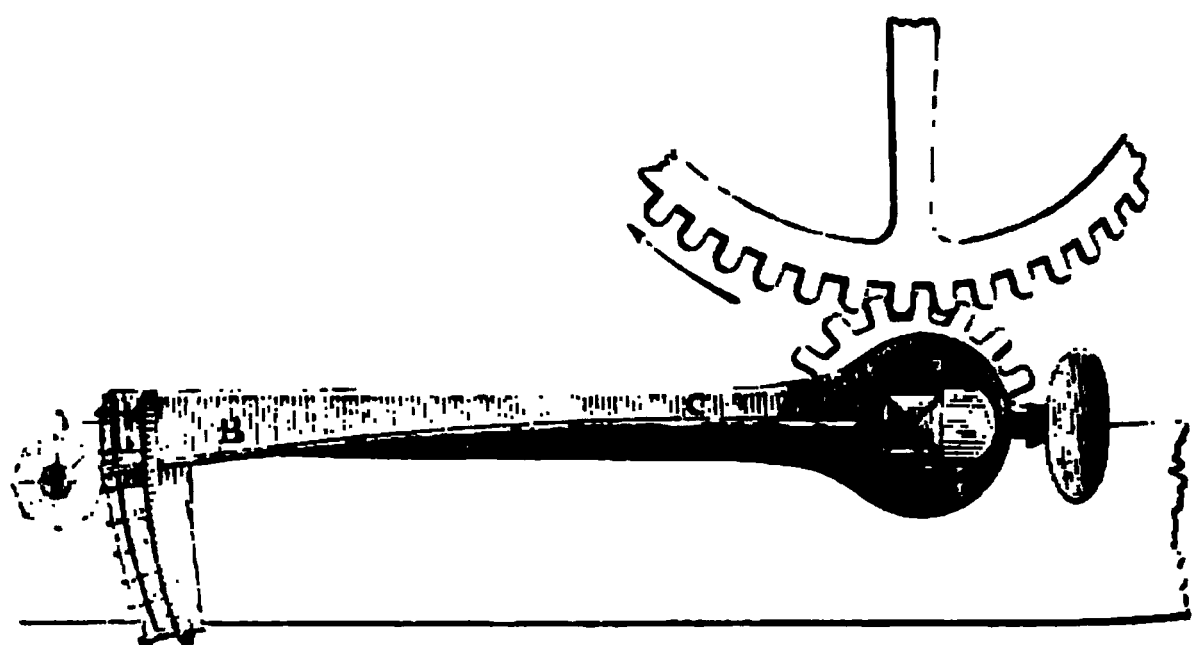


Fig. 269.

que ensuite on produit le mouvement de rotation, en agissant sur cette manivelle, le ressort fléchit, et la quantité dont il se déforme indique la grandeur de la pression appliquée à la poignée. Un arc de cercle, gradué d'avance, tourne avec la manivelle sans participer à la flexion du ressort : et il suffit de voir à quel point de division correspond un index que porte le ressort, pour connaître le nombre de kilogrammes qui représente cette pression.

En général, on peut dire qu'un homme effectue une plus grande quantité de travail dans sa journée, lorsqu'il se repose de temps en temps, que lorsqu'il agit d'une manière continue. D'un autre côté, cette quantité de travail est d'autant plus grande, que les efforts exercés par ses muscles se rapprochent plus de ceux auxquels ils sont destinés par leur nature. Considérons, par exemple, un homme qui emploie sa journée à monter et à descendre successivement une rampe ou un escalier, sans aucune charge. La simple élévation de son corps, pendant qu'il montera, donnera lieu à une certaine quantité de travail, qu'on évaluera en multipliant son poids par la hauteur totale dont il l'aura élevé suivant la verticale; cette quantité de travail sera plus grande que celle qu'il aurait effectuée dans la même journée, en montant avec une charge et descendant à vide, l'élévation de son corps étant toujours comprise dans l'évaluation du résultat. On voit, en effet, que lorsqu'un homme monte avec une charge, les muscles de ses jambes, qui sont destinés seulement à supporter son corps, se trouvent plus tendus qu'ils ne doivent l'être habituel-

saute une
ne une di-
du travail
muscles.

que c'est
descendant
mont, sans
une rampe
er, qu'un
velopper la
rité de tra-
ouvrant de
travaillant
dant 8 heu-
ms sa jour-
280000 km.
re, agissant
elle, ne pro-
nème temps
; et s'il était
er le mouton
à tiraude.
t guere plus
. Il est donc
ux de faire
vail de l'hom-
ple élévation
outes les fois
vation peut
à la produc-
u on veut ob-
s qu'on peut
emple, lors-
er des terres
un autre, en
l'appareil re-
la fig 270.

se compose
poulie, dans la
ielle passe une
porte à cha-
trinités un grand plateau analogue aux plateaux

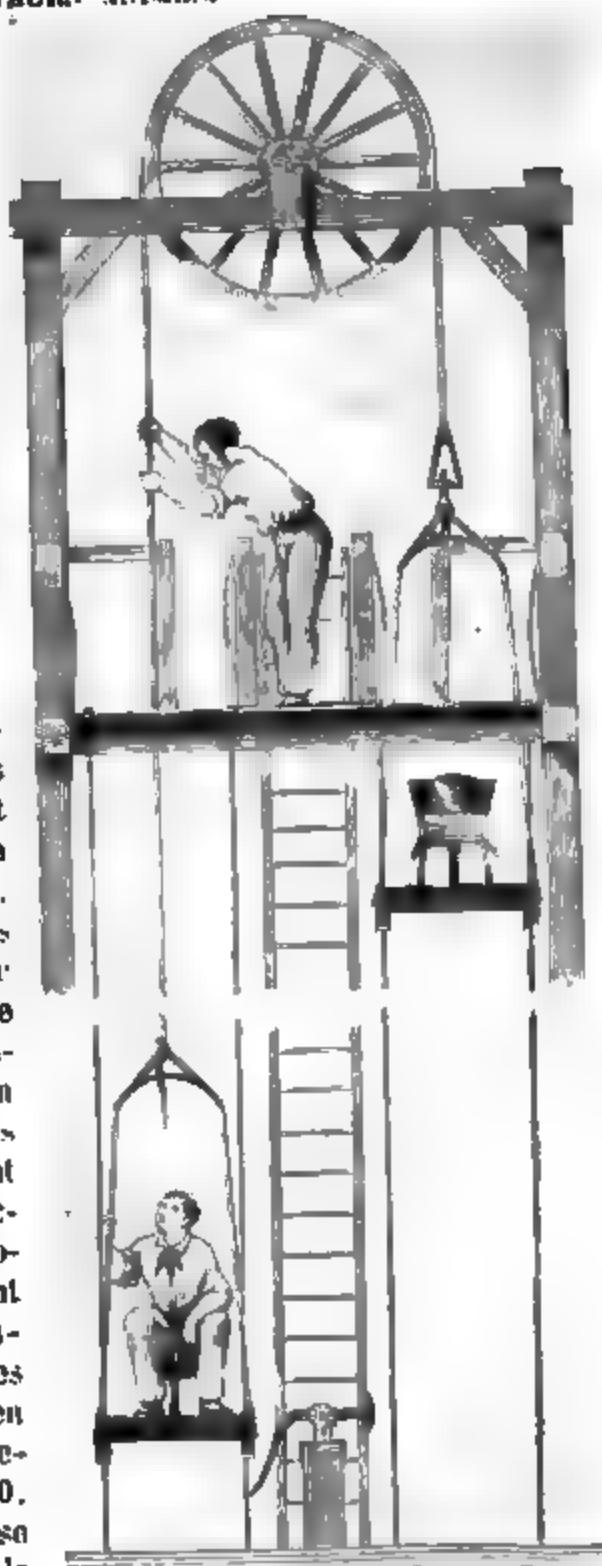


Fig. 270.

304 CONSIDÉRATIONS GÉNÉRALES SUR LES MOTEURS.

de balance. La longueur de corde a été déterminée de manière que l'un des plateaux soit au niveau du sol inférieur, lorsque l'autre est au niveau du sol supérieur. On amène une brouette chargée de terre sur le plateau qui est en bas; en même temps un ouvrier se place, avec une brouette vide, dans l'autre plateau. Si l'ouvrier pèse un peu plus que la terre contenue dans la première brouette, il entraîne la corde; le plateau sur lequel il est placé descend du niveau supérieur au niveau inférieur, et le plateau qui contient la brouette chargée de terre s'élève au contraire du niveau inférieur au niveau supérieur. Alors on décharge les deux plateaux, pour remettre une brouette chargée de terre dans celui qui vient de descendre, et une brouette vide, avec un ouvrier, dans celui qui vient de monter; les plateaux se mettent de nouveau en mouvement en sens contraire, et ainsi de suite. Les brouettes pleines sont amenées au bas de l'appareil; à mesure qu'elles sont élevées au niveau supérieur, on les emmène pour les vider; puis on les ramène vides vers le haut de l'appareil; elles redescendent, et retournent à l'endroit où elles doivent être remplies pour recommencer le même mouvement. Des ouvriers sont employés, les uns au niveau inférieur, les autres au niveau supérieur, pour rouler les brouettes pleines ou vides; en même temps d'autres ouvriers sont uniquement occupés à monter du niveau inférieur au niveau supérieur, à l'aide d'une échelle placée entre les deux plateaux, et à descendre successivement, un à un, avec une brouette vide, dans l'un ou l'autre de ces deux plateaux. Un homme, placé au haut de l'appareil, agit sur la corde pour ralentir ou accélérer le mouvement, suivant que le poids du plateau descendant l'emporte plus ou moins sur le poids du plateau ascendant. Cet appareil a été employé pour la première fois dans les travaux de terrassements effectués au fort de Vincennes, près Paris, et y a procuré une économie considérable.

Lorsqu'un homme agit sur une roue à chevilles (§ 57), le travail qu'il effectue consiste uniquement dans l'élévation de son corps, qui redescend aussitôt en faisant tourner la roue; il se trouve dans des conditions analogues à celles d'un homme qui monte une échelle, pour employer ensuite son poids à la production d'un effet utile. Aussi la quantité de travail qu'il effectue, dans une journée de 8 heures, va-t-elle jusqu'à 259 000^{kgm}. On voit par là que les roues à chevilles sont d'excellentes machines pour utiliser la force de l'homme. Le mouvement de rotation qu'elles reçoivent de l'action d'un ou de plusieurs hommes, peut d'ailleurs être employé à tout autre usage qu'à extraire les pierres des carrières.

Le cheval est très souvent employé comme moteur. Mais au moins de variété que l'homme, dans la manière peut être appliquée. Son mode d'action se réduit presque à tirer horizontalement, dans le sens dans lequel il faut d'ailleurs appliquer au travail du cheval les mêmes règles générales qu'au travail de l'homme.

Le maximum qu'un cheval peut exercer en tirant, s'élève à 400^k ; mais lorsqu'il travaille d'une manière continue, il tire beaucoup moins. Un bon cheval de roulier, qui marche par semaine, et qui fait environ 28 kilomètres par semaine à une vitesse de 8 kilomètres par heure, exerce une force d'environ 50 kilogrammes : le travail qu'il développe en une journée s'élève à $1\ 400\ 000^{\text{km}}$.

On veut employer la force du cheval à autre chose qu'au roulement, on le fait habituellement agir dans un manège. Le cheval est attelé à une pièce de bois fixée à un arbre vertical : cet arbre, en tournant, et fait prendre à cet arbre un mouvement de rotation qui peut ensuite se transmettre à toute espèce de machine, on peut dire que le manège est pour le cheval ce que

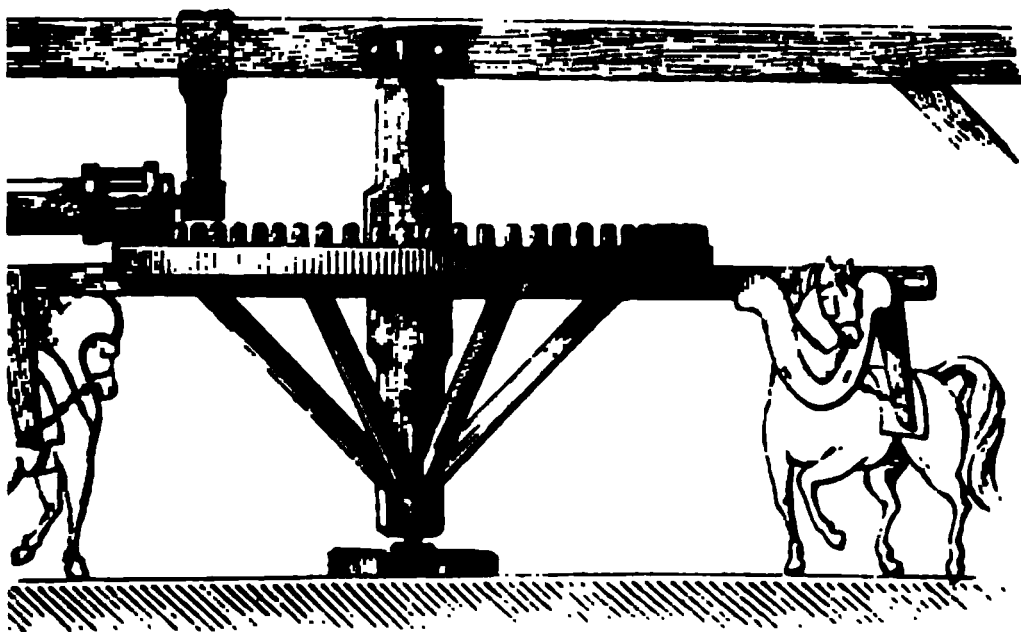


Fig. 271.

est pour l'homme. Un cheval qui travaille dans un manège produit moins d'effet qu'un cheval de roulier, et se fatigue plus vite. Pour qu'il ne soit pas trop gêné, il faut que le manège ait un diamètre de 43 mètres. En comparant la quantité de travail effectuée dans un manège, avec celle qui est effectuée par un homme agissant sur une manivelle, on trouve qu'un cheval équivaut à peu près à 7 hommes.

Le travail effectué, en une seconde de temps, par un cheval attelé à un manège, ne dépasse pas 42^{km} . On voit donc que nous avons eu raison de dire (§ 200) que la force d'un cheval est inférieure à ce que l'on nomme un cheval-vapeur ou un cheval mécanique, puisqu'on entend par là une puissance capable de produire un travail de 75^{km} par seconde.

Un bœuf, attelé à une voiture, peut exercer une force de traction presque égale à celle qu'exerce un cheval; mais il produit moitié moins de travail, à cause de sa lenteur naturelle. Ainsi un manège, un bœuf effectue presque autant de travail qu'un cheval.

Un âne agissant sur un manège ne produit guère plus de travail que du travail effectué par un cheval.

§ 203. Mouvement perpétuel.—C'est ici le lieu d'entrer dans quelques détails sur la fameuse question du mouvement perpétuel dont tant de personnes se sont occupées, et s'occupent encore maintenant. Mais avant tout il est indispensable de savoir au juste qu'on entend sous le nom de mouvement perpétuel.

La plupart des personnes qui n'ont pas étudié la question, croient naturellement que la recherche du mouvement perpétuel consiste dans la recherche d'un corps qui soit perpétuellement en mouvement. Aussi, quand on affirme que la découverte du mouvement perpétuel est impossible, trouve-t-on d'assez nombreux incrédules et il y en a qui prétendent prouver que cette affirmation n'est pas exacte, en donnant pour exemple la terre, dont le mouvement autour du soleil présente pour eux tous les caractères du mouvement perpétuel. Mais ceux qui connaissent la question, ceux surtout qui ont fait leurs efforts pour en trouver la solution, donnent une toute autre signification au mouvement perpétuel.

Nous avons dit que, pour vaincre les résistances appliquées à une machine, et entretenir par là son mouvement, il fallait lui appliquer une puissance: nous avons ajouté que cette puissance est habituellement empruntée aux moteurs animés, ou à une machine d'eau, ou au vent, ou à la vapeur. Quand on cherche le mouvement perpétuel, on se propose de trouver une machine qui puisse fonctionner, sans avoir recours à aucun de ces agents, ni à aucun du même genre; on cherche une machine motrice qui puisse produire du travail utile, sans être soumise à l'action d'un moteur quelconque, en un mot, construire une machine qui soit elle-même son moteur.

On comprend dès lors tout l'intérêt que présente cette question pour ceux qui croient que la solution en est possible, et qui passent

et cette solution. Les machines, qui rendent tant de service, ont toujours besoin d'un moteur. Pendant les siècles, les hommes, les animaux, l'eau et le vent étaient les moteurs employés. Mais, d'une part, l'emploi des hommes et des animaux entraîne une dépense continuelle. D'une autre part, les machines ne peuvent être employées que dans des positions fixes. Les chutes d'eau sont limitées, et l'on ne peut pas en faire de nouvelles : le vent est une source de mouvement mais il présente trop d'irrégularité dans son action. Les machines à vapeur ont rendu un service immense, elles ont donné le moyen d'établir partout un moteur aussi puissant. L'emploi d'une machine à vapeur nécessite une dépense continuelle, comme l'emploi des moteurs animés ; cette dépense, résultant de la consommation du combustible, est toujours la même, quelle que soit la force du moteur, à celle qu'occasionneraient des hommes ou des animaux. Il faut un assez grand nombre pour produire le même effet. Mais, quoiqu'on cherche le mouvement perpétuel, on veut aller plus loin ; on veut trouver une machine qui puisse atteindre le même but que les machines à vapeur, mais qui ne nécessite aucune autre dépense que celle de son entretien. Il est bien clair que celui qui trouverait cette découverte y trouverait immédiatement une fortune immense : ce serait pour lui l'équivalent de la pierre philosophale. C'est ce qui explique pourquoi tant de personnes s'y intéressent et s'y appliquent encore. On peut même dire que la découverte du mouvement perpétuel serait infiniment préférable à celle de la pierre philosophale. Celui qui trouverait le moyen de produire la richesse sans fin enrichirait, il est vrai ; mais il n'en résulterait pas un avantage marqué pour la société en général. L'or n'est utile que pour lui-même, mais pour la valeur de convention attribuée, et cette valeur diminuerait aussitôt qu'on en aurait fabriqué autant qu'on voudrait. La découverte du mouvement perpétuel, au contraire, permettrait de donner un plus grand développement à l'industrie, et aurait pour conséquence la fabrication d'une foule d'objets qui concourent au bien-être des hommes. L'auteur d'une pareille découverte serait le bienfaiteur de l'humanité.

Malheureusement cette découverte est impossible. Et il ne faut pas que nous voulons dire, par là, que les moyens dont nous disposons soient impuissants pour nous y conduire. Le mouvement perpétuel n'est pas seulement impossible ; elle est d'une impossibilité absolue. La vérité est établie rigoureusement, tout aussi bien que

celle des théorèmes de géométrie. C'est ce qui résulte des principes exposés précédemment. Nous avons vu, en effet, que le travail moteur développé pendant toute la durée de la marche d'une machine n'est jamais inférieur au travail résistant total qui s'est produit pendant le même intervalle de temps. Le premier travail est habituellement égal au dernier; il lui est supérieur, lorsqu'il produit des chocs qui ont détruit une portion du travail utile. Une machine ne peut donc produire aucun travail utile, si elle est soumise à l'action d'une puissance qui développe une quantité de travail moteur égale au travail utile qui doit être effectué contre le travail dû aux résistances passives qui accompagnent toujours la production du travail utile. Une machine ne sert pas à transmettre l'action du moteur pour vaincre des résistances: dans cette transmission, elle n'augmente pas la quantité totale de travail effectuée par ce moteur: elle la diminue plutôt, puisqu'elle surmonte des résistances passives que son mouvement développe en absorbant une portion.

§ 204. Si l'on examine les diverses tentatives qui ont été faites pour arriver à la découverte qui nous occupe, on verra qu'on cherche généralement à produire le mouvement à l'aide d'un corps qui tombe d'une certaine hauteur: ce corps doit être ensuite relevé par la machine même, à la hauteur dont il est tombé, en même temps qu'elle effectuera du travail utile, en raison du mouvement qu'elle aura reçu. En supposant qu'on ait pu disposer la machine de manière à obtenir ce résultat, on voit que le même corps pesant tombant et remontant ainsi successivement, entretenirait le mouvement aussi longtemps qu'on voudrait, et donnerait lieu à la production d'une quantité indéfinie de travail utile.

Ici ce sera une roue hydraulique mise en mouvement par l'eau qu'on a placée dans un réservoir supérieur: la roue est employée à faire mouvoir des pompes, qui remontent dans le réservoir l'eau qui a agi sur la roue, et qui élèvent en outre une certaine quantité d'eau excédante, qui peut être utilisée.

Ailleurs ce sera une roue, taillée comme les roues à rochet des horloges, et portant des tiges égales articulées dans les divers angles formés par les dents, *fig. 272*: ces tiges se terminent par des boules de même poids. Si l'on fait tourner la roue dans le sens de la flèche, chaque tige prend successivement des positions différentes dans l'angle au fond duquel elle est articulée, en raison de l'action de la pesanteur qui tend toujours à mettre son centre de gravité plus bas possible. D'après les idées de l'auteur de cette machine, le mouvement doit s'entretenir de lui-même, et vaincre en m

la résistance appliquée à la machine, parce que les boules pendantes sont plus éloignées du centre de la verticale passant par l'axe de la roue, et que les boules agissent sur un bras de levier.

Autre fois ce sera une machine (fig. 273), pouvant tourner sur un axe B, et contenant du mercure C; deux pièces fixes D, destinées à arrêter la caisse dans son mouvement de rotation, en sorte qu'elle peut osciller, en venant appuyer alternativement sur l'un ou sur l'autre de ces deux arrêts.

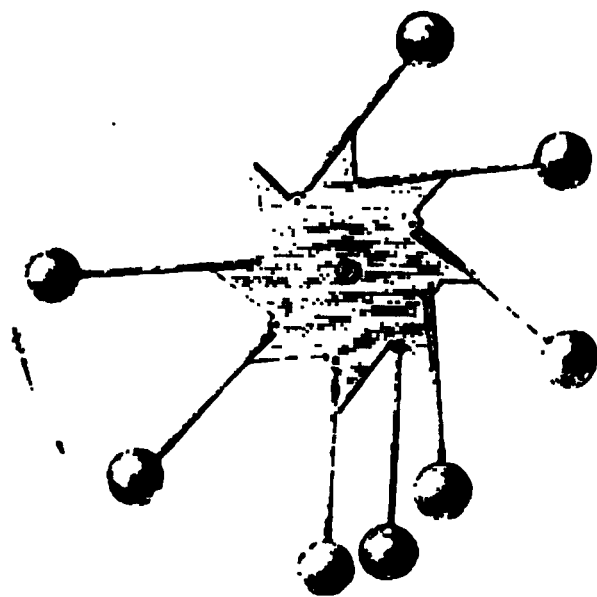


Fig. 272.



Fig. 273.

Le mouvement de bascule que la caisse prend ainsi la caisse se communique, à l'aide d'engrenages, à un volant qui prend un mouvement de plus en plus rapide: ce volant agit alors sur un bras qui remonte le mercure, en replaçant la caisse dans sa position horizontale, et l'inclinant même un peu en sens contraire; le mercure coule de l'autre côté, et le nouveau mouvement communiqué ainsi à la caisse entretient le mouvement du volant, qui agit encore, et ainsi de suite. Le mouvement de bascule que la caisse prend alternativement, dans un sens et dans l'autre, donne naissance à un mouvement continu du volant, qui doit pouvoir effectuer un travail utile.

Il n'est pas nécessaire d'ajouter qu'aucun des essais qui ont été faits sur ces idées n'a réussi. Un corps qui tombe d'une certaine hauteur ne peut pas déterminer un mouvement capable de le ramener à son point de départ, et de produire en même temps un mouvement utile. Si en était ainsi, le travail résistant serait plus grand que le travail moteur, puisqu'une portion seulement du travail réellement produit correspond à l'élévation du corps qui est tombé, et le reste au travail moteur total. La machine ne serait-elle employée à produire aucun effet utile, qu'elle ne pourrait pas encore produire un effet utile; puisque, si elle marchait, le travail résistant surpasserait le travail moteur de tout le travail correspondant aux

310 CONSIDÉRATIONS GÉNÉRALES SUR LES MOTEURS

résistances passives, travail qu'on peut bien atténuer, mais ne peut pas détruire complètement. Dans le premier des trois exemples qui viennent d'être cités, la roue hydraulique ne peut qu'autant que les pompes sont disposées de manière à élever le réservoir, une portion seulement de l'eau qui fait tourner. Dans le second exemple, les boules qui descendraient, si elles ne se produisaient dans le sens de la flèche, agissent bien à l'extrémité d'un plus grand bras de levier que les autres pour empêcher le mouvement, mais celles qui sont placées de l'autre côté sont nombreuses. Tantôt les premières l'emportent sur les dernières, tantôt au contraire les dernières l'emportent sur les premières, cela établit une compensation, qui n'a pas lieu à chaque instant, mais qui a lieu en moyenne pendant un tour entier de la roue. Dans le troisième exemple, la caisse, en s'inclinant d'un côté, produit un mouvement qui peut bien la relever, mais pas assez pour qu'elle commence à s'incliner de l'autre côté, et que la roue continue le mouvement.

Toutes ces tentatives sont fondées, ainsi que nous l'avons dit, sur des notions d'équilibre, surtout sur celles de l'équilibre du levier, notions qui n'ont pas été complétées par l'étude des machines à l'état de mouvement. Si l'on se pénétrait bien de ce principe, d'après lequel *ce qu'on gagne en force on le perd en vitesse*, on ne s'exercerait pas en vains efforts pour arriver à la découverte du mouvement perpétuel.

DEUXIÈME PARTIE.

MÉCANIQUE DES FLUIDES.

15. Les principes généraux de la mécanique, que nous avons dans la première partie de cet ouvrage, s'appliquent à toute **de corps**. Mais, quand on considère spécialement les liquides **gaz**, on reconnaît qu'il doit exister pour eux des principes **autres**, dépendant de leur constitution propre. Cette seconde a pour objet l'exposition de ces principes; elle comprendra, **en même temps**, leur application à l'étude des machines et des **phénomènes** mécaniques où les liquides et les gaz jouent un **important**.

PRINCIPES RELATIFS A L'ÉQUILIBRE DES FLUIDES.

06. **Transmission des pressions dans un liquide.** — Tous **corps** que nous voyons autour de nous sont pesants, c'est-à-dire **ils sont soumis** à l'action de la pesanteur. Mais cette propriété **pas inhérente** à leur nature; elle est due à l'attraction qu'ils **reçoivent** de la part de la terre, dans le voisinage de laquelle ils se **sont** placés. Si chacun d'eux était porté dans un lieu de l'espace **loin** éloigné de la terre, et de tous les corps célestes, qui **sont** capables d'exercer une attraction analogue, ils cesseraient **d'être** pesants. Nous sommes donc en droit de supposer que cer- **tains** corps **ne sont pas** pesants, sans pour cela rien changer à leur **état**: c'est ce que nous **devons** faire pour les li- **quides** dont nous allons **nous occuper**, afin d'étu- **dier** plus facilement la **transmission** des pressions **à leur** intermédiaire.



Fig. 274.

Soit AB, fig 274, un tuyau d'une forme quelconque, mais dont **la section transversale est la même dans toute sa longueur**. Conce- **vons** qu'on ait introduit dans ce tuyau un liquide non pesant, de

312 PRINCIPES RELATIFS A L'EQUILIBRE DES FLUIDES

l'eau par exemple ; concevons , en outre , qu'on en ait deux extrémités A et B à l'aide de deux disques, ou pistons, dont les contours s'adaptent exactement aux parois intérieures du vase. Si l'on vient à pousser le piston A, ce piston poussera le liquide, lequel poussera à son tour le piston B, et tendra à le faire sortir. Pour maintenir le piston B dans la position qu'on lui avait donnée, on sera obligé de lui appliquer une force résistante qui équilibre l'action de la force qui est appliquée au piston A. Or, on verra sans peine que cette force résistante, appliquée au piston B, doit être égale à la force appliquée au piston A, pour qu'elle fasse équilibre.

§ 207. Prenons maintenant un vase fermé, d'une forme quelconque, *fig. 275*, et complètement rempli d'un liquide non pesant.

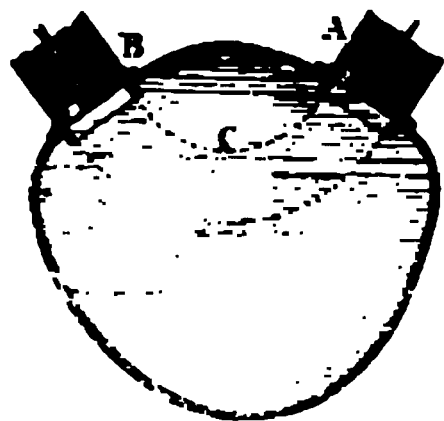


Fig. 275.

Supposons que l'on pratique deux ouvertures A, B, de mêmes dimensions, dans les parois de ce vase : qu'on adapte deux tuyaux à ces ouvertures, et qu'on introduise deux pistons dont les faces intérieures viennent s'appuyer sur le fond des tuyaux de manière à remplacer les parois qui ont été enlevées. Si l'on vient à pousser le piston A, pour le faire entrer à l'intérieur du vase, le liquide tend à sortir par l'ouverture B, en repoussant le piston qui la ferme.

Pour empêcher le liquide de sortir, et maintenir le piston B dans la position qu'il a reçue, on devra lui appliquer une force résistante, capable de faire équilibre à la force qui tend à le faire entrer le piston A à l'intérieur du vase. Il est facile de faire équilibre à cette force, appliquée au piston B, doit encore être égale à la force qui est appliquée au piston A, comme dans le cas précédent. Nous allons, en effet, regarder les deux bouts de tuyau adaptés aux ouvertures A et B, comme étant les extrémités d'un tuyau idéal ACB, dont la section transversale soit la même dans toute sa longueur. Si le piston B a été soumis à une résistance capable de faire équilibre à la pression exercée sur le piston A, on peut supposer que la portion du liquide qui enveloppe le tuyau idéal ACB perd sa fluidité et devienne solide, sans que pour cela l'équilibre soit troublé. Dès lors il ne reste plus de liquide qu'à l'intérieur du tuyau idéal, qui se trouve avoir pour parois le liquide solidifié dont nous venons de parler : les deux pistons se retrouvent dans les mêmes conditions que ceux du § 206 : et par conséquent les forces qui leur sont appliquées doivent être égales.

posons maintenant qu'on ait pratiqué trois ouvertures

fig. 276, dans la paroi du même vase, rempli, comme

, d'un liquide non pesant, et

les ouvertures A, B, qui seront

carrées, soient placées l'une

de manière à avoir un côté

on ferme ces ouvertures par

et qu'on applique à chacun

qui tend à le faire pénétrer

du vase, ces trois forces de-

ales, pour se faire mutuelle-

. Car, dès le moment que les

es aux trois pistons se feront

ne troublera pas cet équilibre

que l'un d'eux soit fixé à la paroi du vase et en fasse

le; et l'on sera ramené par là au cas où la paroi n'est

deux ouvertures égales, ce qui entraîne l'égalité des

es aux pistons qui ferment ces ouvertures.

ix pistons adjacents A et B, au lieu d'être indépen-

l'autre, peuvent être fixés l'un à l'autre, sans que

troublé, pourvu qu'ils restent soumis aux mêmes for-

nsi un piston unique AB, dont la surface sera double

iston C. Les deux forces égales et parallèles, qui

ées aux deux pistons A et B, se trouveront appli-

unique AB, et pourront par conséquent être rem-

seule force, double de chacune d'elles, et ayant la

1. Ainsi on voit que, la paroi du vase étant percée

ures A B, C, dont l'une est deux fois plus grande que

se appliquée au piston qui ferme la première ouver-

double de celle qui est appliquée au piston qui ferme

ir qu'il y ait équilibre.

e même que, si la paroi d'un vase, fermé de toutes

ant un liquide non pesant, était percée de deux ou-

une soit trois fois, quatre fois, cinq fois plus grande

que ces ouvertures fussent fermées par des pistons

rces, l'équilibre ne pourrait avoir lieu qu'autant que

ée, au premier piston serait triple, quadruple, quin-

. Et, en général, on peut en conclure que les forces

ux pistons A, B, *fig. 277*, qui ferment deux ouver-

s dans la paroi d'un vase fermé et contenant un li-

at, doivent être proportionnelles aux grandeurs de

pour qu'il y ait équilibre.

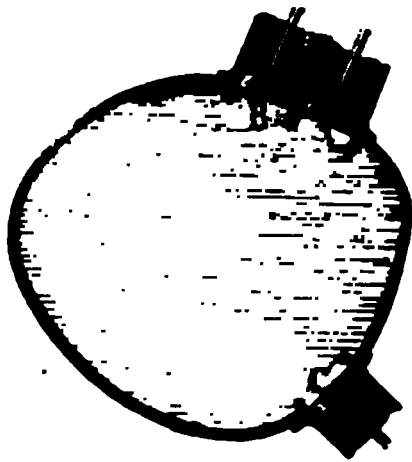


Fig. 276.

§ 209. Lorsqu'une force est appliquée au piston A, fig. 277, de manière à le pousser vers l'intérieur du vase, ce piston presse le fluide ; celui-ci presse à son tour le piston B, et tend à le repousser hors. C'est pour vaincre la pression que le piston B éprouve de la part du fluide qu'on est obligé de lui appliquer une force résistante capable de le maintenir en équilibre. La force qui s'applique ainsi est donc égale à la pression, et peut lui servir de mesure. Si le piston B était fixé à la paroi du vase de manière à en faire partie, il n'aurait plus besoin d'être maintenu en équilibre par une force : mais il n'en éprouverait pas moins la même pression de la part du liquide. Et comme le piston B. ainsi que le piston A, se trouve dans les mêmes conditions que les autres portions de la paroi du vase, on peut dire que la force appliquée au piston A est égale à la somme des pressions du liquide sur toutes les parties de cette paroi. Plus, d'après ce qui précède, ces pressions sont proportionnelles aux grandeurs des portions de la paroi sur lesquelles elles agissent : c'est ce qui constitue le principe de la transmission de la pression dans un liquide.

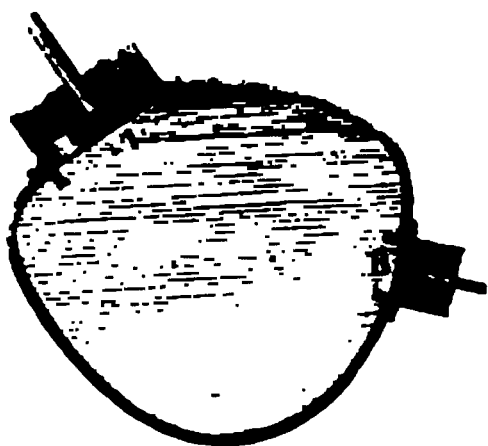


Fig. 277.

Supposons, par exemple, que le piston A ait une surface de 10 centimètres carrés, et que la force qui lui est appliquée soit de 50 kilogrammes. Par suite de l'action de cette force, le piston A pressera la paroi de toutes parts : la pression qu'il exerce sur une étendue de 1 centimètre carré sera de 5 kilogrammes ; sur une étendue de 2 centimètres carrés, la pression sera de 10 kilogrammes ; sur une étendue de 3 centimètres carrés, elle sera de 15 kilogrammes, et ainsi de suite. On dira, dans ce cas, que la pression exercée par le liquide sur la paroi est de 5 kilogrammes par mètre carré : cette pression de 5 kilogrammes est ce que l'on appelle la pression rapportée à l'unité de surface.

§ 210. **Pression aux divers points d'une masse liquide. — Égalité de pression dans tous les sens.** — Prenons un point quelconque A, fig. 278, à l'intérieur d'une masse liquide contenue dans une enveloppe fermée. Nous pouvons imaginer un petit plan *mn*, d'une direction quelconque, passe par ce point. Le liquide exerce une pression sur les diverses parties de ce plan. Si l'on suppose que le plan *mn* soit perpendiculaire à la direction d'une force appliquée au piston B, le petit plan *mn* éprouvera

pression sur chacune de ses deux faces, ainsi que nous allons.
 Concevons pour cela qu'une surface pq , de forme arbitraire,
 avec le petit plan mn , et s'étende de
 parts jusqu'à la paroi du vase, de ma-
 nière de diviser le liquide en deux portions
 distinctes, C, D. L'équilibre du liquide
 n'est pas troublé, si nous supposons que
 la partie C soit solidifiée, et cette hypothèse
 ne changera évidemment en rien les condi-
 tions dans lesquelles se trouve la face du
 plan mn qui est en regard de la partie D.
 Alors ce plan appartiendra à l'enveloppe
 qui enfermera le liquide restant, et il éprou-
 vera en conséquence la même pression que
 les autres parties de cette enveloppe, à égalité de sur-

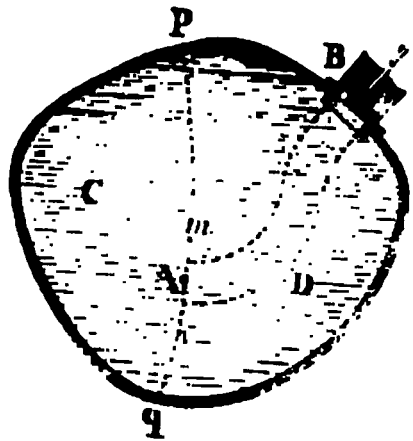


Fig. 278.

ainsi l'application d'une force au piston B détermine, non seu-
 lement une pression du liquide sur chaque portion de la paroi du
 vase qui le contient, mais encore une pression sur chaque face d'un
 plan quelconque qu'on imagine mené par un point pris à l'intérieur
 de la masse liquide ; et toutes ces pressions sont les mêmes, pour
 la même étendue de surface pressée. Les pressions que suppor-
 tent les deux faces du plan sont, bien entendu, dirigées perpen-
 diculairement à ce plan.

Si l'on conçoit, par le même point A, successivement divers plans
 comme mn , fig. 278, tous ces plans éprouveront la même pression
 par l'unité de surface : puisque, d'après ce que nous venons de voir,
 la pression ne dépend en aucune manière de la direction du plan.
 C'est ce qui constitue le principe de l'égalité de pression dans tous
 les sens autour d'un point. La pression supportée par l'unité de
 surface d'un quelconque de ces plans qui passent par le point A,
 est ce que l'on nomme la pression au point A.

§ 211. Pressions dans les liquides pesants. — Les résultats
 précédents ont été obtenus en supposant que les liquides dont il
 s'agit n'étaient pas pesants. Nous allons revenir à la réalité, en
 faisant plus abstraction de l'action de la pesanteur, et nous ver-
 rons en quoi les résultats auxquels nous sommes parvenus seront
 modifiés.

Lorsqu'un vase fermé de toutes parts est rempli d'un liquide pe-
 sant, ce liquide exerce des pressions sur les diverses portions de
 la paroi, soit que ces pressions soient occasionnées par l'application
 d'une force à un piston, comme nous l'avons supposé jusqu'à pré-

316 PRINCIPES RELATIFS A L'ÉQUILIBRE DES FLUIDES.

sent, soit qu'elles proviennent simplement du poids du liquide même. Mais ces pressions n'ont plus la même grandeur, à égale surface, dans les divers points de la paroi ; elles varient d'un point à un autre, comme nous le verrons tout à l'heure, en raison de l'action de la pesanteur. Cependant, si l'on considère les pressions qui supportent les divers plans qu'on peut imaginer par un même point

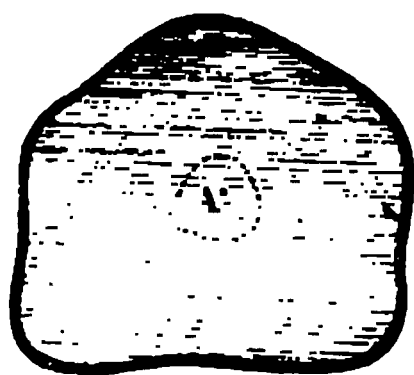


Fig. 279.

fig. 279, pris à l'intérieur de la masse fluide, on reconnaît que ces pressions sont encore égales entre elles, pour une même étendue de surface, pourvu que cette étendue soit très petite. Voici comment on peut s'en rendre compte.

Si l'on conçoit une surface fermée, de petites dimensions, qui prenne le point A à son intérieur, fig. 279, on pourra admettre que tout le liquide situé en dehors de cette surface soit solidifié, et que l'équilibre soit troublé, et sans que le liquide très voisin du point A cesse d'être dans les mêmes conditions. Mais alors on n'a plus que la petite quantité de liquide contenue à l'intérieur de cette surface, et ce liquide exercera contre elle des pressions en ses divers points. Ces pressions seront encore inégales, puisque le liquide dont le produit est pesant ; mais on conçoit que, le poids de ce liquide tout entier étant très petit, l'action de ce poids ne pourra introduire que de très petites différences entre les pressions que le liquide exerce aux divers points de son enveloppe : et ces différences seront d'autant plus faibles qu'on aura donné de plus petites dimensions à la surface fermée qu'on a imaginée autour du point A. Supposant donc que les dimensions de cette petite surface se diminuent indéfiniment, les pressions qu'elle supportera sur ses divers points, de la part du liquide qu'elle contient, approcheront plus en plus d'être égales entre elles ; c'est-à-dire que ces pressions approcheront de plus en plus d'être les mêmes que si le liquide environnant le point A n'était pas pesant. Ainsi, en admettant que la surface dont nous parlons soit très petite, on pourra, sans se tromper d'une manière appréciable, regarder le liquide qu'elle contient comme soumis à l'action de la pesanteur. Il s'ensuit que les pressions exercées sur les divers plans qu'on peut faire passer par le point A sont les mêmes, à égalité d'étendue, pourvu que l'on ne donne à ces plans que de très petites dimensions, de manière qu'ils soient toujours contenus à l'intérieur de la petite surface qui nous a servi pour arriver à ce résultat. Le principe de l'égalité de pressions

les sens, autour d'un point, est donc vrai pour les liquides pesants, aussi bien que pour les liquides non pesants.

Nous venons de dire que l'égalité des pressions exercées sur les plans qu'on peut imaginer par un même point A d'une masse liquide pesante, n'avait lieu qu'autant qu'on ne prenait que de très petites surfaces sur tous ces plans, autour du point A. Généralement les pressions ne seraient plus égales entre elles, si on les prenait l'unité de surface de chacun de ces plans, à moins que cette

unité de surface ne fût extrêmement petite. Pour pouvoir arriver à l'idée de ce qu'on nomme la pression au point A de la masse liquide, on conçoit que l'unité de surface de chacun des plans qu'on fait faire passer par ce point soit uniformément pressée dans toute son étendue, et cela de la même manière qu'elle l'est réellement dans le voisinage du point A : la pression totale que supporterait si cette unité de surface ne varierait plus d'un plan à un autre, c'est cette pression totale qui forme ce qu'on appelle la pression au point A.

§ 212. Examinons maintenant de quelle manière varie la pression d'un point à un autre, à l'intérieur d'une masse liquide pesante, en équilibre.

Prenons d'abord deux points A, B, *fig.* 280, qui soient situés sur un même plan horizontal. Nous pouvons imaginer, autour de ces deux points comme centres, deux petits cercles égaux, dont les plans soient dirigés perpendiculairement à la ligne droite AB qui joint les deux points : nous pouvons concevoir en outre que ces deux petits cercles forment les deux bases d'un cylindre, dont la ligne AB serait l'axe, et que tout le liquide qui est en dedans de ce cylindre soit solidifié. Nous aurons plus ainsi qu'à considérer le liquide contenu à l'intérieur du cylindre. Il est bien clair que les pressions exercées par ce liquide sur les deux bases A et B du cylindre sont égales entre elles, tout aussi bien que si ce liquide n'était pas pesant : les forces qui résultent de l'action de la pesanteur sur les diverses molécules du liquide, étant toutes verticales, ne tendent pas plus à le faire sortir par une des bases du cylindre que par l'autre. L'égalité des pressions exercées par le liquide, sur les deux petits cercles que nous avons imaginés autour des points A et B avait donc lieu aussi avant qu'on ait solidifié le liquide situé en dehors du cylindre : et, par conséquent,

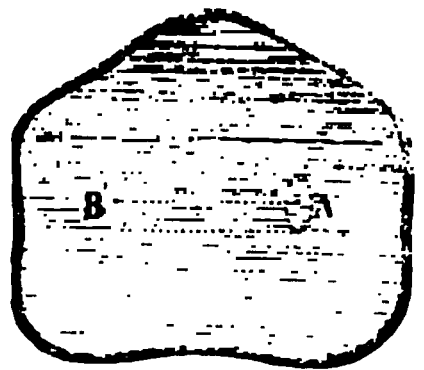


Fig. 280.

318 PRINCIPES RELATIFS A L'ÉQUILIBRE DES FLUIDES.

les pressions aux deux points A et B sont égales entre elles ; il voit par là que, dans une masse liquide pesante en équilibre, la pression est la même pour tous les points situés sur un même plan horizontal.

§ 213. Considérons ensuite deux points A, B, fig. 281, situés sur une même verticale. Nous imaginons autour de ces deux points comme centres, deux petits cercles égaux, tracés sur des plans horizontaux ; nous regardons même ces deux petits cercles comme les bases d'un cylindre ayant pour axe la droite AB, et nous supposons que tout le liquide qui est en dehors de ce cylindre se dilate. Dans cet état de choses, on ne suppose pas que le liquide n'exerce pas des pressions sur les deux bases du cylindre.

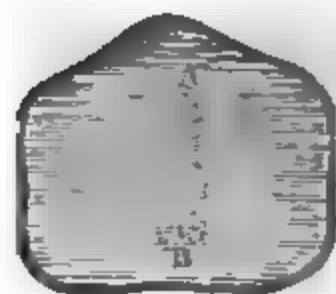
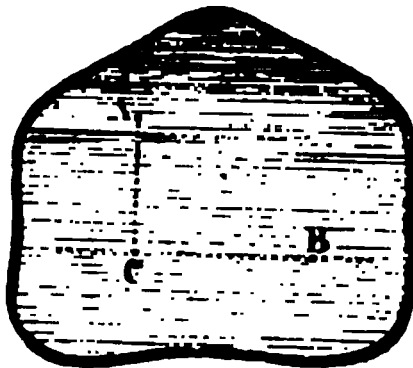


fig. 281.

Si la base supérieure n'avait aucune pression de la part du liquide, elle ne soutiendrait rien, et la base inférieure n'aurait à supporter le poids du liquide. Si la base supérieure éprouve une pression de la part du liquide, elle réagit sur lui, en produisant une pression égale : cette pression se transmet, sans changer de grandeur, sur la base inférieure du cylindre ; et cette base inférieure a, en conséquence, à supporter la pression qui lui est transmise, et, en outre, le poids du liquide contenu dans le cylindre. Donc, dans tous les cas, la pression que supporte la base inférieure du cylindre est plus grande que la pression supportée par sa base supérieure, d'une quantité égale au poids du liquide qu'il contient.

Ce qui a lieu après qu'on a solidifié le liquide situé en dedans du cylindre, avait également lieu avant cette solidification. Dans un liquide pesant, la différence entre les pressions supportées par deux surfaces égales, placées en deux points qui sont sur une même verticale, est égale au poids du liquide que contiendrait un cylindre ayant pour base une de ces deux surfaces, et pour hauteur la distance des deux points où elles sont placées. Et si l'on observe que la pression en un point d'un liquide, rapportée à l'unité de surface (§§ 210 et 211), on énoncerait la proposition suivante : *La pression en un point d'un liquide pesante est égale à la pression en un autre point situé directement au-dessus du premier, augmentée du poids du liquide qui contiendrait un cylindre ayant pour base l'unité de surface, et pour hauteur la distance des deux points.*

deux points A, B, d'une masse liquide pesante sont situés, ni sur une même verticale, ni sur la même horizontale. Pour comparer la pression en ces deux points, on mène une verticale menant par A et une horizontale menant par B. La pression en B et C sont égales. La pression en C est égale à la pression en A, d'une part, et à la pression en B, d'autre part, du liquide que renferme le tube pour base l'unité.



The diagram shows an irregularly shaped mass representing a liquid. Inside the mass, there are three points labeled A, B, and C. Point A is at the top left, point B is at the middle right, and point C is at the bottom left. A vertical line segment, representing a tube, is drawn from point A down to point C. The tube is filled with a hatched pattern, indicating it contains liquid. The points A, B, and C are marked with small circles.

Fig. 282.

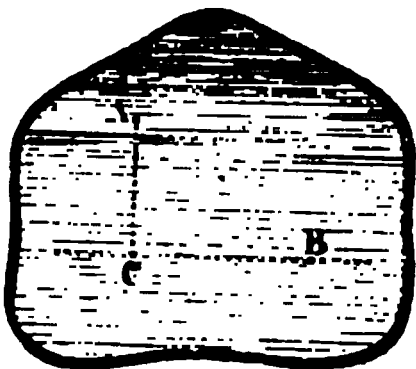



Fig. 282.

l'auteur la ligne AC, qui n'est autre chose que le niveau des deux points A et B. Donc, en définitive : *La pression en un point d'un liquide pesant est égale au poids d'une colonne de ce liquide prise pour base l'unité de surface et pour hauteur la distance de ce point au niveau.*

s qu'un liquide pesant exerce en divers points le renferme se déduisent très facilement de divers points de la masse liquide. Nous avons est la même pour tous les points du liquide zontal : il en résulte qu'une petite portion de dans le voisinage du point A, *fig. 283*, sup- n qu'une surface d'égale quelconque des points du isse par ce point A. La nité de surface au point e simplement la pression la même que la pression point du liquide pris au entendre ici par pression surface au point A, la



The diagram shows a circular cross-section of a liquid. A horizontal line divides the circle into two equal halves. Point A is located on the upper half, and point B is located on the lower half. The circle is filled with horizontal lines, representing the liquid's surface or internal structure.

Fig. 283.



Fig. 283.

ait une surface plane d'une étendue égale
nt A, dans la direction de la paroi du vase,
ses parties de la même manière que dans
point A. Nous verrons également que la
la paroi, au point B, est la même que celle
onque des points du liquide, pris sur le
se par ce point B. Donc la pression exercée
n un des points de la paroi du vase qui le

contient, est égale à celle qu'il exerce en un autre point de la paroi, situé plus haut que le premier, augmentée du poids d'un cylindre de ce liquide, qui aurait pour base l'unité de surface et pour hauteur la différence de niveau de ces deux points. Il est évident que si les deux points étaient situés à un même niveau, les pressions que le liquide exercerait en ces deux points seraient égales.

§ 216. Ce que nous venons de trouver permet d'évaluer la résultante des pressions qu'un liquide exerce en deux points de la paroi d'un vase qui le renferme ; mais cela ne conduit nullement à nier les pressions elles-mêmes, qui dépendent des circonstances dans lesquelles le liquide est placé. En le supposant toujours tenu dans un vase fermé de toutes parts, on peut concevoir une portion de la paroi du vase soit remplacée par un piston auquel on appliquera une force, ainsi que nous l'avons fait précédemment pour un liquide non pesant. Cette force, en enfonçant le piston à l'intérieur du vase, presse le liquide ; le liquide presse à son tour les diverses parties de la paroi qui l'empêchent de céder à l'action du piston. Mais ces pressions, transmises à la paroi par le liquide, ne sont plus les mêmes, à égalité de surface, que cela avait lieu dans le cas d'un liquide non pesant : elles ont des différences qui résultent de l'action de la pesanteur du liquide, différences dont nous avons trouvé la grandeur.

Sauf cette modification, due au poids du liquide, la transmission des pressions s'effectue de même que dans les liquides non pesants que nous avons considérés d'abord. On peut même, pour

faire abstraction du poids du liquide, lorsque les pressions sont appliquées, et qu'il s'agit de leur transmission aux parois, sont très grandes que les dimensions du vase dans le sens vertical, sont assez grandes. On n'altère ainsi les diversions que de quantités qui sont insignifiantes, relativement aux grandeurs respectives.

§ 217. C'est sur le principe de la transmission des pressions dans les liquides qu'est fondée la pneumatique, imaginée par Pascal. Soient deux cylindres creux, comme ceux de la fig. 281, qui communiquent

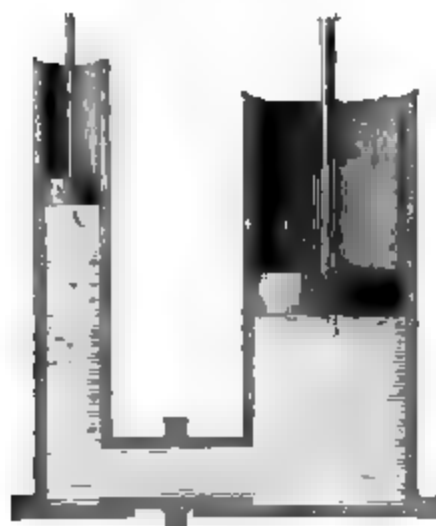


Fig. 281.

leurs parties inférieures, et dans lesquels peuvent se mou-

1. Supposons que les portions de ces cylindres, qui sont au-dessus des pistons, sont remplies d'eau, ainsi que le tuyau qui les communique l'un à l'autre. Si l'on vient à exercer une pression sur le piston A, cette pression se transmettra au piston B, en s'accroissant dans le rapport des surfaces des deux pistons. Si, par exemple, la surface du piston A est 400 fois plus petite que celle du piston B, une pression de 5 kilogrammes appliquée au premier, de haut en bas, fera supporter au second, de bas en haut, une pression de 500 kilogrammes (nous négligeons ici le poids de l'eau). Cet appareil permet donc d'exercer une pression aussi grande qu'on voudra, avec une force donnée, puisqu'il suffit pour cela de prendre le piston B assez grand relativement au piston A. Il peut être assimilé au levier, à l'aide duquel on peut atteindre le même

effet. Si le piston B cède à l'action de la pression qu'il supporte, et qu'il s'élève d'une certaine quantité, le piston A devra s'abaisser : mais les deux pistons ne marcheront pas également. Le volume de l'eau doit rester le même, la quantité dont la capacité intérieure du cylindre diminue d'une part, en A, doit être égale à celle dont elle augmente d'une autre part en B ; et comme ces quantités sont les surfaces de deux cylindres ayant pour bases les surfaces des deux pistons, et pour hauteurs les chemins que ces pistons parcourent, il suit que ces chemins parcourus par les deux pistons sont inversement proportionnels à leurs surfaces. Donc si, d'une part, une pression de 5^k, appliquée au piston A, détermine une pression de 500^k appliquée au piston B, d'une autre part, le premier piston s'abaissera 400 fois plus vite que le second : donc enfin, comme dans le levier, *ce qu'on gagne en force, on le perd en vitesse*.

12. Nous nous contenterons ici de faire connaître le principe de la machine hydraulique, remettant à faire la description de cette machine telle qu'elle est employée, après que nous aurons étudié les principes.

§ 8. Surface libre d'un liquide pesant. — Dans ce qui précède nous avons considéré la masse liquide pesante, qui faisait l'objet de nos recherches, comme remplissant complètement la capacité du vase fermé de toutes parts. Lorsqu'il n'en est pas ainsi, c'est-à-dire que le volume du liquide soit plus petit que la capacité du vase fermé, soit que le vase soit ouvert dans sa partie supérieure, la surface de la masse liquide n'est pas en tous points en contact avec la paroi du vase. Le liquide, cédant à l'action de la pesanteur, s'écoule vers le fond du vase, et il présente, dans sa partie supérieure, une surface libre dont nous allons nous occuper.

322 PRINCIPES RELATIFS A L'ÉQUILIBRE DES FLUIDES

Si les molécules liquides ne sont soumises qu'à l'action pesanteur, outre celle des forces moléculaires qui existent, et qu'aucune pression ne soit appliquée aux divers points de la surface libre du liquide, cette surface libre sera plane et horizontale. Pour nous en rendre compte, observons que tout ce que nous avons trouvé précédemment, relativement aux pressions dans un liquide pesant en équilibre, est tout aussi vrai dans le cas d'un liquide terminé par une surface libre, que dans le cas d'un liquide contenu dans un vase fermé. Rien ne s'oppose, en effet, à ce que nous imaginions que le vase dans lequel est placé un liquide terminé par une surface libre, devienne un vase fermé, à l'aide d'une paroi idéale qui agit sur toute cette surface libre, en n'exerçant aucune pression en ses divers points; l'addition de cette paroi ne modifiera pas les pressions qui ont lieu à l'intérieur du liquide, ni celles qu'exerce sur les différentes parties du vase qui le supportent.



Fig. 285.

sons donc que la surface libre d'un liquide ne peut pas être plane et horizontale, et nous verrons qu'il est impossible que ce liquide soit en équilibre. Nous pourrions, pour cela, sur la surface libre, deux points A et B, *fig. 285*, qui ne soient pas à la même hauteur. Nous menons, par ces deux points, deux lignes verticales AC, BD, et que nous les terminions en deux points C, D, situés sur un même plan horizontal.

Les pressions en ces deux derniers points ne seraient pas égales : car, les pressions en A et B étant les mêmes, celles qui auraient lieu en C et D seraient les poids de deux colonnes de liquide, ayant pour base l'unité de surface, et pour hauteurs, l'une AC, l'autre BD. Cette inégalité des pressions est la conséquence nécessaire de ce que les points A et B ne sont pas sur un même niveau, nous démontré que le liquide ne peut pas être en équilibre avec une pareille forme de surface libre.



Fig. 286.

puisque dans tout liquide pesant en équilibre, les pressions doivent être les mêmes pour tous les points situés sur un même plan horizontal (§ 217).

§ 219 On peut encore faire voir d'une autre manière que la surface libre d'un liquide, dont les molécules ne sont soumises qu'à l'action de la pesanteur, doit être plane et horizontale, pour que le liquide soit en équilibre. Si cette surface avait la forme indiquée par la *fig. 286*, une molécule placée sur une partie inclinée de cette surface, se mettrait en mouvement. Voyons en effet de quelle manière

se mettrait en mouvement. Voyons en effet de quelle manière

force verticale dirigée suivant AB, tend à la déplacer, tant avec les actions qu'elle éprouve de la part des molécules. Ces actions ne peuvent provenir que de molécules liées : la plus grande distance à laquelle elles se sont librement petite, que l'on peut regarder la portion de la surface qui environne le point A, jusqu'à une pareille distance de ce point, comme étant une portion de surface plane. Il est clair que les forces moléculaires auxquelles la molécule se trouve soumise se sont disposées symétriquement tout autour de la perpendiculaire AC à la surface libre, et qu'en conséquence la résultante de ces forces (§ 36) sera dirigée suivant cette perpendiculaire. Supposons maintenant que le poids de la molécule soit décomposé en une composante suivant AC, et une autre force perpendiculaire à AC, dirigée dans le plan tangent à la surface au point A. La résultante de ces deux composantes pourra bien être détruite par la résultante des actions moléculaires, dont la direction est la même : la première composante aura tout son effet, et fera glisser la molécule sur la surface du liquide. L'équilibre ne peut donc pas subsister tant que la surface libre n'est pas plane et horizontale.

Pressions supportées par les parois. — Lorsqu'un li-
 quide, en équilibre, est terminé par une surface libre dont les
 points ne supportent aucune pression, il est facile de trouver
 la valeur de la pression qui a lieu en chaque point de la masse
 aussi de celle que le liquide exerce sur chaque portion de
 sa surface intérieure. Pour avoir la pression au point
 A, on observera que la pression est nulle au point B de la
 surface libre qui est situé verticalement au-dessus
 de A; donc, d'après le § 213, la pression au point A est
 égale au poids d'un cylindre du liquide qui aurait pour
 base l'unité de surface, et pour hauteur la distance verti-
 cale AB du point A à la surface libre du liquide. De même,
 la pression au point C, sur la paroi du vase qui contient le
 liquide, est dirigée suivant la perpendiculaire CD
 et son intensité est égale au poids d'un cylindre du liquide,
 qui aurait pour base l'unité de surface, et pour hauteur
 la distance verticale CD du point C à la surface libre du li-
 quide.

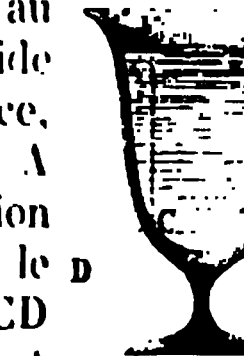


Fig. 287.



Fig. 287.

puide dont on s'occupe est de l'eau, il suffira de se rappeler que 1 centimètre cube d'eau pèse 1 gramme (1), pour pouvoir

ne 1 centimètre cube d'eau pèse 1 gramme, il faut que l'eau soit pure, et

324 PRINCIPES RELATIFS A L'ÉQUILIBRE DES FLUIDES

évaluer facilement en nombres les pressions exercées par le liquide. Prenons, par exemple, le centimètre carré pour unité de surface. Nous trouverons que la pression au point A, *fig. 287*, est de grammes qu'il y a de centimètres dans la hauteur AB, et la pression que le liquide exerce en C, sur la paroi du vase, est de grammes qu'il y a de centimètres dans la hauteur CE. Si l'on prenait le décimètre carré, ou le mètre carré, pour unité de surface, ces pressions seraient d'autant de kilogrammes, ou de fois 1000 kilogrammes, que les hauteurs AB, CE, contiennent de décimètres, ou de mètres.

Dans le cas où le liquide considéré ne sera pas de même densité que l'eau, on pourra déterminer les pressions qu'il exerce, qu'autant qu'on connaîtra le rapport qui existe entre le poids d'un certain volume de ce liquide et le poids d'un égal volume d'eau, c'est-à-dire la densité du liquide. Prenons pour exemple le mercure, dont la densité est 13,6 ; nous observerons que, d'après cette densité, le poids d'un centimètre cube de mercure sera de 136 grammes. En conséquence, nous pouvons dire que la pression en A, *fig. 287*, est de 136 grammes au centimètre carré, est d'autant de fois 136,6, que la hauteur AB contient de centimètres.

§ 221. Il résulte évidemment de ce qui précède qu'on ne peut pas de prendre la pression rapportée à l'unité de surface en un point de la paroi, on voulait obtenir la pression supportée par une certaine portion de cette paroi, on n'aurait qu'à évaluer le poids du cylindre du liquide proposé, qui aurait pour base cette portion de paroi, et pour la hauteur la distance verticale d'un de ses sommets au-dessous de la surface libre du liquide.

Lorsqu'on voudra évaluer la pression supportée par une certaine portion de la paroi contre laquelle le liquide s'appuie, on pourra décomposer cette portion de paroi en très petites parties élémentaires, et trouver ensuite la pression exercée par le liquide sur chacune de ces parties, puis on composera entre elles toutes les pressions élémentaires.

Si la portion de paroi qu'on considère est plane, toutes les pressions supportées par ses diverses parties auront des directions parallèles, et par suite ces pressions auront toujours une résultante qui sera égale à leur somme (§ 23). Concevons qu'on ait déterminé le centre de gravité de la portion de la paroi qui nous occupe, et

que sa température soit celle du maximum de densité. Mais dans les applications qu'il s'agit de trouver les pressions exercées par l'eau ordinaire, on peut prendre 1 centimètre cube de cette eau pour peser toujours 1 gramme ; l'erreur commise sera généralement sans importance.

comme une surface pesante (§ 40) : la résultante dont nous venons de parler sera égale au poids d'un cylindre du liquide, qui a pour base toute cette portion de paroi, et pour hauteur la distance verticale de son centre de gravité au-dessous de la surface du liquide. Quant au point d'application de la résultante, point que l'on nomme le *centre de pression*, ce ne sera pas le centre de gravité de la portion de paroi que l'on considère, mais un point situé plus bas que ce centre de gravité. Nous nous contenterons d'énoncer les résultats, que l'on démontre dans les traités de mécanique rationnelle, et d'en vérifier l'exactitude dans un exemple particulier.

222. Soit AB, *fig.* 288. une paroi plane et inclinée contre laquelle vient s'appuyer une masse de liquide en équilibre. Supposons que cette paroi ait la forme d'un rectangle, et que ses deux côtés soient horizontaux ; ce sera, par exemple, une vanne destinée à maintenir le liquide, et à se lever pour le laisser couler en cas de besoin. Nous admettrons, comme précédemment, qu'aucune pression n'agisse sur la surface libre du liquide, et que cette surface, qui sera plane et horizontale, vienne se terminer en C sur la paroi plane que nous considérons ; l'eau pressera donc uniquement la portion CB de cette paroi, portion qui sera également rectangulaire. Pour évaluer la pression exercée par l'eau sur ce rectangle, nous le diviserons en un grand nombre de bandes horizontales, en traçant idéalement sur sa surface des parallèles à sa base, également espacées les unes des autres, ainsi que le montre la *fig.* 289. Nous concevrons ensuite que chacune de ces bandes soit divisée à son tour en un grand nombre de petits rectangles égaux, par des lignes perpendiculaires à sa longueur.

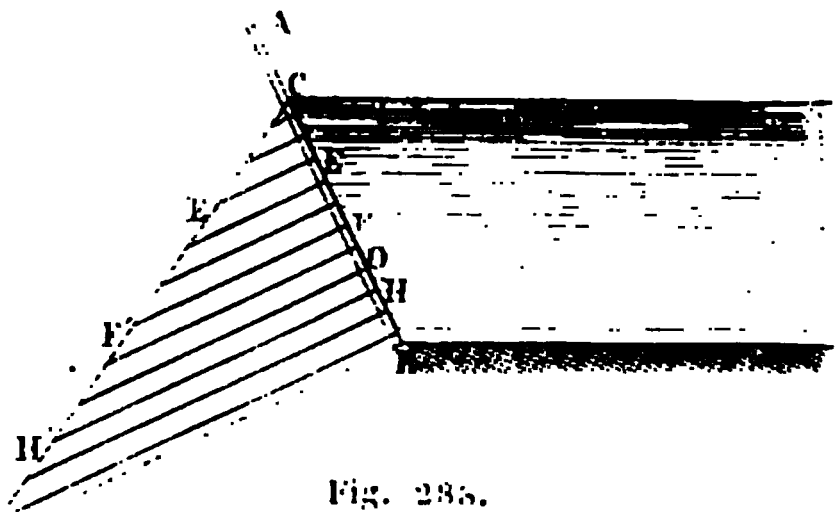


Fig. 288.

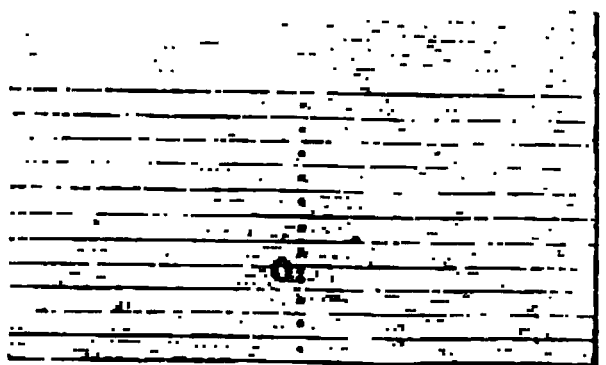


Fig. 289.

28

326 PRINCIPES RELATIFS A L'ÉQUILIBRE DES FLU

fig. 290. La pression supportée par chacun de ces petits rectangles sera égale au poids d'un prisme d'eau ayant pour base



Fig. 290.

et pour hauteur la distance verticale d'un de ses points à la surface libre du liquide. La somme de ces pressions supportées

sur des rectangles, dans lesquels une même bande a été prise, sont égales entre elles, puisque ces rectangles sont tous de même profondeur au-dessous de la surface libre du liquide. La somme de ces pressions, obtenue en faisant leur somme, sera égale au poids d'un prisme d'eau qui aurait pour base la surface entière, et pour hauteur la distance verticale d'un quelconque de ses points à la surface libre : de plus, le point d'application de cette résultante sera placé au milieu de la longueur de la surface, au point où se croiseraient ses diagonales.

Toutes les pressions résultantes, qui correspondent à des bandes dans lesquelles la paroi tout entière a été divisée, peuvent être représentées par des lignes droites telles que FF' , HH' , *fig. 288*, dirigées perpendiculairement à la surface libre. Ces lignes droites, menées par les centres des bandes, de longueur proportionnelle aux forces auxquelles elles correspondent (§ 19), et par conséquent aussi proportionnelle à la distance verticale de ces centres à la surface libre de la surface, sont donc toutes situées sur une même ligne droite CD qui aboutit au point C où aboutit la surface libre du liquide. Il ne s'agit que de trouver la résultante de toutes les forces parallèles

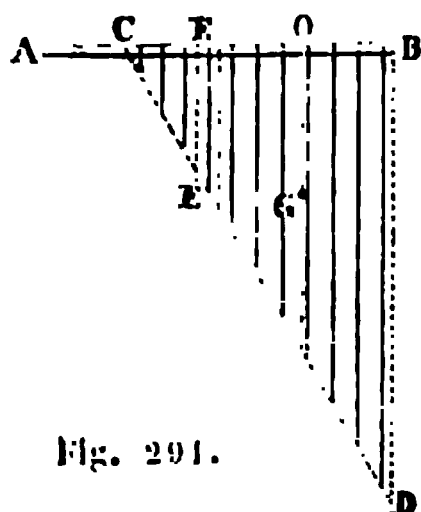


Fig. 291.

représentées par ces lignes, résultante qui sera la pression totale supportée par la surface rectangulaire AB .

Pour y arriver, imaginons que la surface soit placée horizontalement, comme dans la *fig. 291* : les lignes qui représentent les forces appliquées aux centres des bandes dans lesquelles la surface a été décomposée deviendront verticales. Nous pourrions alors concevoir que ces lignes soient remplacées par des tiges de même longueur, suspendues à la surface

et tellement choisies que le poids de chacune d'elles soit égal à la force dont elle tient la place. La paroi AB sera chargée du poids de ces tiges, comme elle l'était précédemment par la

divers points. Or, si ces diverses tiges sont aplaties, de représenter une largeur uniforme assez grande pour être en unes avec les autres, on voit que la charge totale, sur la paroi AB, n'est autre que le poids du triangle pesant comme ce poids est une force verticale, appliquée au centre G du triangle, il s'ensuit que la résultante définitive des pressées par l'eau sur les diverses parties de la paroi AB point O, situé verticalement au-dessus du centre de gravité qui est en conséquence au tiers de la longueur BC, à partir de B. Ainsi le centre de pression, pour la paroi rectangulaire nous considérons, *fig.* 288, est placé sur la ligne des milieux des côtés horizontaux du rectangle pressé par le tiers de cette ligne à partir du fond.

La grandeur de la pression totale, on voit par la *fig.* 291 et la même, si toutes les tiges pesantes, au lieu de croître en longueur de C en B, avaient toutes la même longueur qui est au milieu de CB. On peut donc dire que la pression totale, supportée par la paroi rectangulaire AB, est égale à celle qu'elle supporterait, si tous ses points étaient à la même distance verticale de la surface libre du liquide que son centre de gravité, c'est-à-dire le milieu de BC; ou bien encore que cette pression totale est égale à celle exercée par un prisme d'eau qui aurait la même hauteur que toute la surface pressée, et dont le centre de gravité serait à la même distance verticale du centre de gravité de cette surface à la surface libre du liquide.

Il résulte de ce qui précède que la pression exercée par un liquide sur le fond d'un vase qui le contient, *fig.* 292, est égale au poids de la colonne ABCD située verticalement au-dessus du fond; en sorte que cette pression ne dépend ni de la grandeur du fond, ni de la grandeur de la surface libre du liquide, ni de la forme des parois latérales du vase, mais uniquement de la hauteur du liquide, et de la surface libre du liquide, sur cette surface, lors même que le vase serait très étroit, *fig.* 293 et 294, la pression sur le fond serait toujours égale à celle exercée par le liquide qui contiendrait le cylindre ABCD, quoique

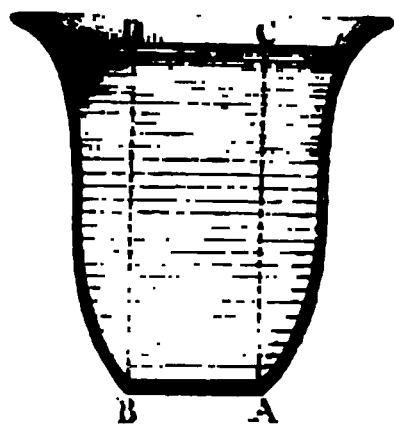


Fig. 292.

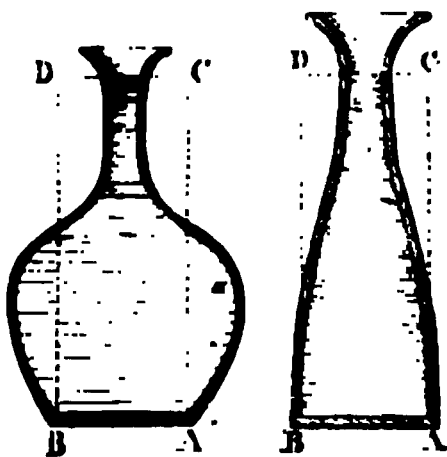


Fig. 293.

Fig. 294.

328 PRINCIPES RELATIFS A L'ÉQUILIBRE DES FLUIDES

le contour de ce cylindre ne soit pas tout entier contenu à l'intérieur du liquide.

Cette conséquence singulière des principes dont nous venons de reconnaître l'existence peut être vérifiée de la manière suivante à l'aide de l'appareil de de Haldat. Cet appareil. *fig. 295.*

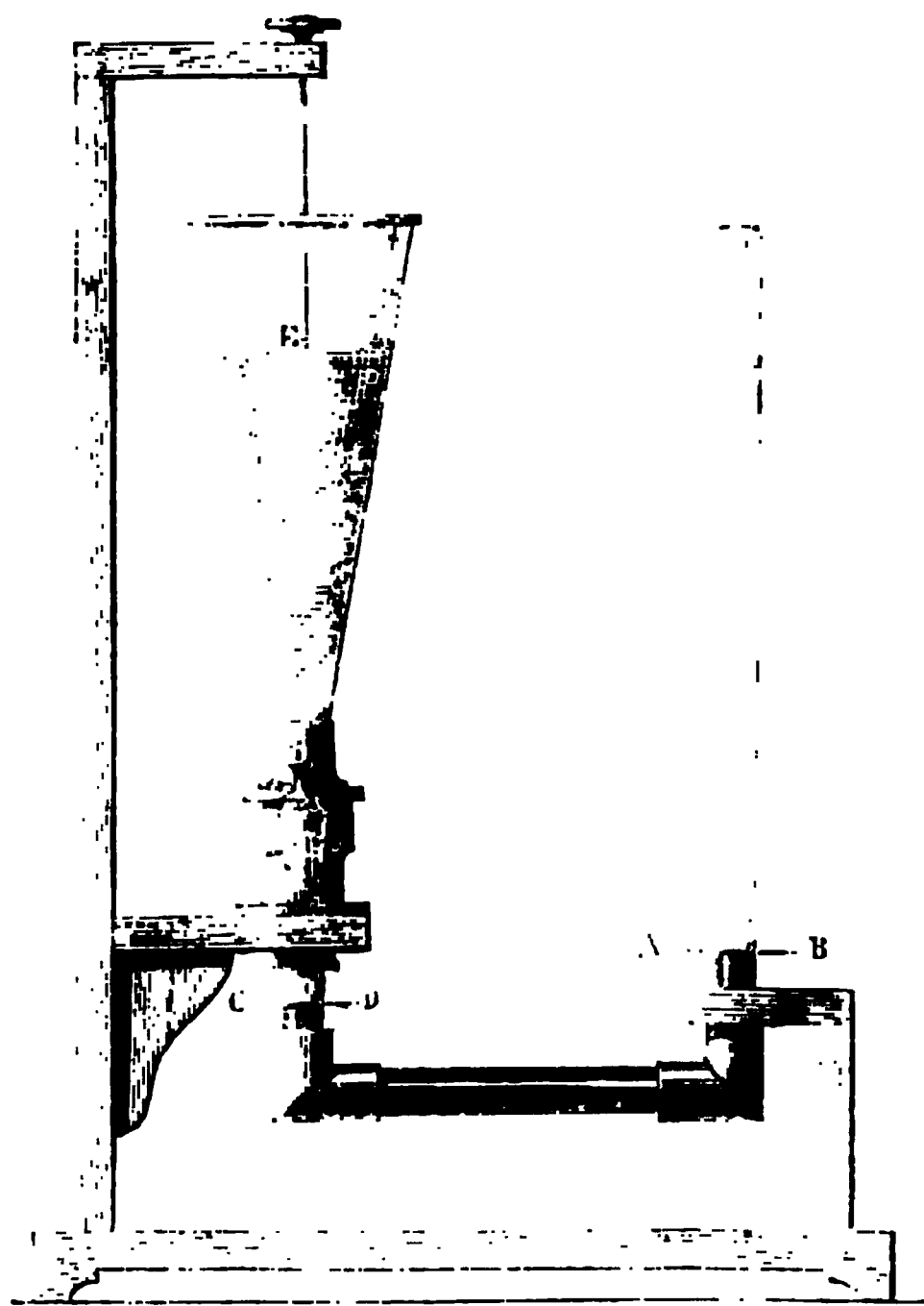


Fig. 295.

Fig.

se compose d'un tube horizontal, aux deux extrémités duquel sont attachés deux autres tubes qui se relèvent verticalement. L'un de ces derniers tubes, plus court que l'autre, est muni d'une garniture métallique *a* portant intérieurement un filet de vis, à laquelle on fixe successivement des vases de formes différentes. Le vase sur cette garniture métallique, dans la *fig. 295*, s'élargit en forme d'entonnoir depuis le bas jusqu'en haut, et présente ainsi à peu près la forme d'un entonnoir. Les *fig. 296* et *297* représentent de

ces, qui peuvent être montés sur la même garniture métallique : sont de simples tubes de diamètres différents, qui s'élargissent vers le haut pour qu'on puisse facilement y verser un liquide. Pour l'expérience à laquelle cet appareil est destiné, on verse du mercure à l'intérieur, jusqu'à ce que le tube horizontal en soit plein, ainsi qu'une portion de chacun des deux tubes verticaux. Le mercure monte également dans ces deux tubes : mais si l'on vient à verser sur la surface libre de ce liquide dans le tube de gauche, il est refoulé dans l'autre tube, et s'y élèvera d'autant plus que la pression aura été plus forte. Pour produire cette pression, on verse l'eau dans le vase qui surmonte la garniture métallique *a*. L'eau ne peut s'appuyer sur la surface libre CD du mercure, surface qui n'est en réalité le fond du vase qui contient l'eau ; et la pression que le mercure éprouve le fait monter dans l'autre tube, jusqu'au niveau AB. On marque ce niveau sur le tube, en y collant un petit morceau de papier. Cela fait, on retire l'eau à l'aide d'un robinet dont la garniture métallique *a* est munie : on dévisse le vase qui surmonte cette garniture, pour le remplacer par un autre d'une forme différente, *fig.* 296 ou 297 ; puis on verse de l'eau dans le nouveau vase, jusqu'à la même hauteur que précédemment, ce que l'on reconnaît à l'aide d'une tige E, dont l'extrémité inférieure doit seulement toucher la surface du liquide. En examinant alors la surface libre du mercure dans le tube de droite, on voit qu'elle se trouve au même niveau marqué par l'index de papier : la pression supportée par la surface CD du mercure est donc la même dans les deux cas, quelque que les parois latérales des vases, auxquels cette surface a successivement servi de fond, aient des formes très différentes.

§ 224. Si un vase avait un large fond, et se rétrécissait ensuite de manière à présenter dans toute sa hauteur des dimensions transversales plus petites que celles de son fond, *fig.* 294, la pression exercée sur le fond par le liquide contenu dans ce vase serait plus grande que le poids total du liquide. Voici comment on peut se rendre compte de ce résultat, qui semble, au premier abord, être tout à fait impossible.

Si l'on pèse un vase vide, puis qu'on le pèse de nouveau après y avoir versé un liquide, l'augmentation de poids qu'on trouve est égale au poids du liquide qui a été mis dans le vase. Voyons de quelle manière le liquide agit sur le vase, pour lui communiquer cette augmentation de poids. Chaque portion de la paroi intérieure du vase qui est touchée par le liquide en éprouve une pression dépendant de son étendue et de sa distance verticale à la surface libre du liquide. Ce sont toutes ces pressions, exercées par le liquide

330 PRINCIPES RELATIFS A L'ÉQUILIBRE DES FLUIDES

sur les diverses parties de la paroi du vase avec laquelle il est en contact, qui se composent pour donner lieu à une résultante qui soutient le poids de tout le liquide; en sorte qu'en définitive le vase est soumis à son poids propre, et à l'action de cette résultante. On ne faut pas confondre la résultante dont nous parlons avec la pression que le liquide exerce sur le fond du vase; car ce n'est que qu'une partie de la surface qui est touchée par le liquide. La résultante de toutes les pressions que le liquide exerce contre la paroi peut s'obtenir en composant entre elles les pressions exercées en divers points des parois latérales, puis composant la résultante partielle ainsi obtenue avec la pression supportée par le fond. Il peut arriver que cette résultante partielle, au lieu d'augmenter la pression appliquée au fond du vase, en se composant avec elle, la diminue au contraire. C'est ce que nous ferons facilement comprendre.

La pression en un point C de la paroi d'un vase, *fig. 298*, est dirigée suivant la ligne CD perpendiculaire à la paroi en ce point. Cette pression, qui agit du dedans au dehors, peut être décomposée en deux forces, dont l'une CE est horizontale, et l'autre CF verticale. La dernière composante est dirigée de bas en haut, si le point C est pris plus bas, à une petite distance du fond.

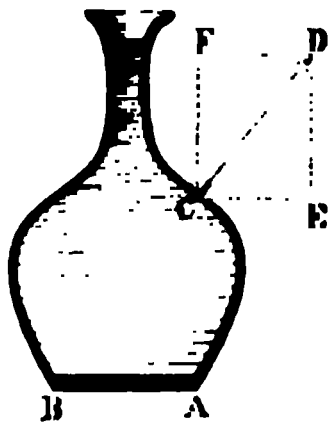


Fig. 298.

Si l'on effectue une décomposition semblable pour toutes les pressions que supportent diverses portions de la paroi latérale du vase, on trouvera une série de composantes horizontales telles que CE, et une série de composantes verticales telles que CF. Les composantes horizontales, dont les directions divergent autour du vase, se détruisent mutuellement, qu'on le reconnait en étudiant la question du fond : il est clair d'ailleurs que, si elles ne se détruisaient pas, elles tendraient à faire

le vase horizontalement, ce qui évidemment ne peut pas avoir lieu.

Quant aux composantes verticales, elles sont toutes dirigées soit de bas en haut, soit de haut en bas. Ces composantes verticales pourront être remplacées par une force unique, également verticale, dirigée de bas en haut ou de haut en bas, suivant les cas. La force unique ainsi obtenue sera précisément la résultante partielle dont nous avons parlé plus haut. On voit donc que cette résultante partielle augmentera ou diminuera la pression sur le fond.

ase, en se composant avec elle, suivant qu'elle agira ou de bas en haut. Dans le premier cas, la pression au fond du vase sera plus petite que le poids total du e second cas, elle sera plus grande que ce poids.

liquide pesant, en équilibre, se trouve en contact avec ire d'une portion de paroi plane et horizontale, il la alement et de bas en haut, de manière à la soulever ; qu'elle supportera ainsi sera égale au poids d'un cy- o qui aurait pour base cette portion de paroi, et pour tance verticale à la surface libre du liquide. C'est ce ifier par l'expérience suivante.

n large tube de terre ouvert par les deux extrémités, uit verticalement dans un vase contenant de l'eau, intenant un disque de verre *ab* constamment appliqué

ds de son extrémité infé- s d'une ficelle qui est fixée et qui sert à le soutenir. t pas s'introduire dans le son ouverture inférieure e le disque *ab* : mais elle en haut sur ce disque, et ver, ce que l'on reconnaît observant qu'il ne tombe qu'on abandonne la ficelle à jusque-là à le soutenir.

que la pression supportée it par le disque, pression de tomber, est bien égale t cylindre de liquide qui e pour base, et la distance t la surface libre du liquide il suffit de verser de l'eau du tube. La pression que eco sur la face supérieure d a contre-balancer celle o sur sa face inférieure ; i contre-balance complète-

and l'eau versée dans le tube s'est élevée au ni- de l'eau à l'extérieur : c'est alors seulement que le st plus soutenu par rien, et qu'il tombe au fond du

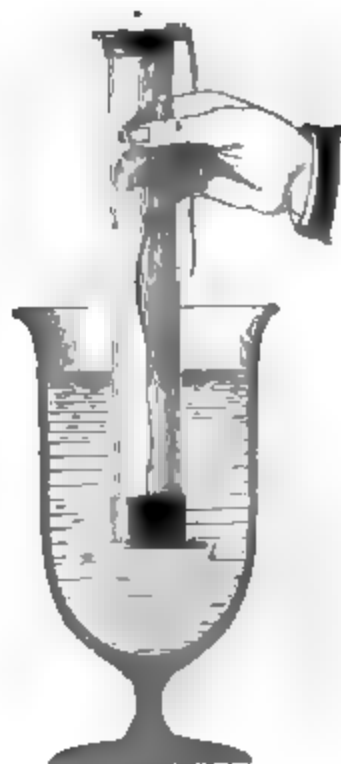


Fig. 299.

tion des principes précédents, qui résulte de cette expé-

332 PRINCIPES RELATIFS A L'ÉQUILIBRE DES FLUIDES.

rience, peut ne pas paraître entièrement exacte, en raison de ce que le disque que l'on emploie a ordinairement, pour la commodité de l'opération, un diamètre plus grand que celui du tube. Mais on observe que la partie de ce disque qui déborde tout autour du tube est également pressée par le liquide sur sa face supérieure et sa face inférieure ; en sorte qu'on ne doit pas en tenir compte, et qu'on ne doit regarder réellement comme pressée de bas en haut la portion de la face inférieure du disque qui est située au-dessous du tube.

§ 226. Nous pouvons, à l'aide de ce qui précède, nous rendre compte de la grandeur des pressions supportées, dans certains cas, par les surfaces contre lesquelles s'appuie un liquide. Prenons pour exemple un *serrement*, espèce de cloison que l'on construit à l'entrée d'une mine, dans une galerie AB, fig. 300, pour intercepter la



Fig. 300.

communication entre la partie A et la partie B et empêcher ainsi les eaux qui arrivent en B, par des fissures du terrain, de venir envahir la partie A. En B, la galerie se remplit complètement d'eau, et le liquide s'étend sans discontinuité dans toutes les fissures qui y communiquent, jusqu'à une grande hauteur au-dessus de la galerie, hauteur qui va souvent à plusieurs centaines de mètres. Supposons, pour fixer les idées, que la surface libre de l'eau, dans les fissures du terrain, est à 100 mètres au-dessus du centre du serrement. La pression supportée par un mètre carré de la surface du serrement sera égale au poids de 100 mètres cubes d'eau, c'est-à-dire qu'elle sera égale à 100 000 kilogrammes ; si le serrement a une surface de 2 mètres carrés, la pression totale qu'il supportera sera de 200 000 kilogrammes. On conçoit par là combien on doit apporter de soin à la construction d'un serrement, pour qu'il puisse résister à une si énorme pression. Soit qu'on le construise en forme de voûte, fig. 300, de manière que la pression s'exerce sur la surface convexe de cette voûte : par cette di-

voit que le serrement ne peut céder à la pression du en écartant les parois de la galerie contre lesquelles il

partie B de la mine qui est inondée, l'eau exerce aussi on énorme sur toutes les parois qu'elle touche. Cette pres- ce aussi bien sur les parois supérieures des cavités on andue, que sur leur sol et sur les parois latérales. Aussi ibue-t-elle puissamment, en pareil cas, à soutenir le ter- st au-dessus de ces cavités ; et si l'on vient à l'épuiser à ompes, pour reprendre les travaux dans les parties de la aient inondées, il se produit des éboulements nombreux, de ce que le terrain n'est plus soutenu comme il l'était it.

Surface de séparation de deux liquides. — Lorsque des différents, non susceptibles de se mêler l'un avec l'autre, is ensemble dans un vase, ils occupent chacun une portion icité du vase, et se touchent le long d'une certaine surface ert do limite commune. Si les deux liquides n'ont pas la nsité (§ 220), et c'est ce qui arrive généralement, l'équili- eut subsister qu'autant que la surface qui les sépare est orizontale. Admettons, en effet, que cette surface n'ait pas oints sur un même plan horizontal, *fig. 301*, et nous allons l'équilibre ne pourra pas avoir lieu. Soient

ix points situés sur un même plan horizon- le liquide inférieur : et C, D, deux autres ués verticalement au-dessus des deux pre- ussi sur un même plan horizontal, dans le supérieur. Les verticales AC, BD, perce- urface de séparation des deux liquides aux , F ; et l'on pourra supposer que les points ent été choisis de manière que les hauteurs soient inégales, ce qui est toujours possible,

ypothèse qui a été faite. Si l'équilibre a lieu, les pressions aux , D, doivent être égales (§ 212). Mais en appliquant ici le rai- ent du § 213, on trouvera que la pression en A, sur une tres rfsace horizontale, sera égale à celle qui a lieu en C, sur une surface, augmentée du poids du liquide qui serait contenu dans dre vertical ayant ces deux surfaces pour bases inférieure et ire. De même, la pression en B, sur une surface de même e, sera égale à la pression qui a lieu en D, sur une surface éga le, tée du poids du liquide que contiendrait un cylindre verti cal it de B en D, et ayant ces deux surfaces pour bases. Mais le



Fig. 301.

pas égales entre elles, donc, l'équilibre ne peut pas
être une conséquence nécessaire de cet équilibre, c'est-
à-dire soient les mêmes, à égalité de surface, pour les
deux sur un même plan horizontal, pris comme on ve
rieur de la masse liquide (§ 212)

Nous pouvons donc dire que, toutes les fois que deu
sants, de densités différentes, se trouveront dans un
ils se disposeront de manière que leur surface de se
plane et horizontale. Nous pouvons dire en outre que
plus lourd, celui dont la densité est la plus grande, s
dessous de l'autre. Cette dernière condition n'est pas
pour l'équilibre, qui aurait lieu tout aussi bien, si le liq
dense était au fond du vase, et qu'il fût surmonté du li
dense: mais dans ce cas l'équilibre serait instable, l
mobilité des liquides ferait que la plus légère cause l
pour ramener le liquide le plus dense au fond du vase

Si un même vase contient plus de deux liquides, de
sites, et non susceptibles de se mêler, il est clair que c
disposeront les uns au-dessus des autres, de manière q
sites décroissent en allant du fond à la surface, et que
séparation de deux d'entre eux soit plane et horizontale
que si l'on verse dans un vase du mercure, de l'eau
qu'on agite le tout et qu'on le laisse ensuite reposer, le

ce du liquide dans l'autre vase. C'est ce dont nous nous aidons facilement de la manière suivante.

B, *fig. 302*, deux points pris à l'intérieur du liquide.

une ligne horizontale qui

tuyau de com-

des deux vases ;

xige que les pres-

es deux points

es (§ 212). La

point A est égale

un cylindre du

on considère

base l'unité de

pour hauteur la distance AC, du point A à la sur-

u liquide dans le vase de droite. La pression au point B

vera pas aussi facilement, en raison de la forme du vase

; voici comment on pourra l'obtenir. La pression en B

la pression en D, augmentée du poids d'un cylindre du

nt pour hauteur BD, et pour base l'unité de surface. La

en D est la même que celle qui a lieu en E : mais la pres-

est égale à la pression en F, augmentée du poids d'un cy-

liquide ayant pour hauteur EF, et pour base l'unité de

onc la pression en B est égale à la pression en F, aug-

poids du liquide que contiendraient deux cylindres ayant

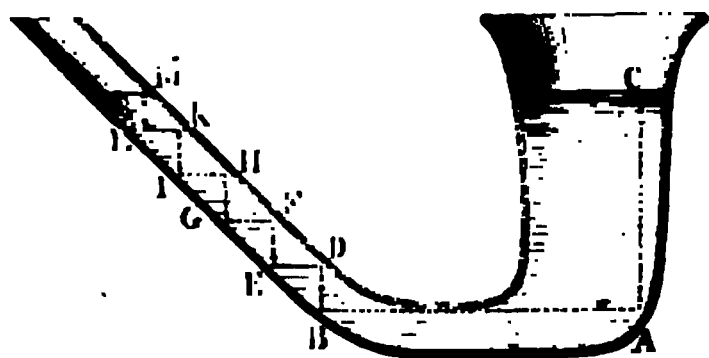


Fig. 302.

pour hauteur la distance AC, du point A à la surface du liquide dans le vase de droite. La pression au point B sera pas aussi facilement, en raison de la forme du vase ; voici comment on pourra l'obtenir. La pression en B

la pression en D, augmentée du poids d'un cylindre du même diamètre pour hauteur BD, et pour base l'unité de surface. La

pression en D est la même que celle qui a lieu en E : mais la pression en E est égale à la pression en F, augmentée du poids d'un cylindre de liquide ayant pour hauteur EF, et pour base l'unité de

surface. Donc la pression en B est égale à la pression en F, augmentée du poids du liquide que contiendraient deux cylindres ayant pour base l'unité de surface, et pour hauteurs, l'un BD,

et l'autre EF. En continuant de la même manière, et observant que la pression en M est nulle, on arrivera à trouver que la pression en B

est égale au poids du liquide que contiendraient cinq cylindres, ayant pour base l'unité de surface, et ayant pour hauteurs les lignes

BD, EF, GH, IK, LM. Les pressions en A et B devant être égales, on trouve que la somme des cinq lignes BD, EF, GH, IK, LM,

est égale à la ligne AC ; ou, en d'autres termes, les surfaces libres du liquide, dans les deux vases, doivent se trouver à une même

hauteur verticale au-dessus du plan horizontal qui passe par les points A et B. Donc, en définitive, ces surfaces libres doivent être situées sur un même plan horizontal.

Cet appareil représenté par la *fig. 303* permet de vérifier très facilement le principe que nous venons de trouver. Cet appareil se compose d'un vase de verre muni inférieurement d'un tuyau horizontal,

au bout duquel est adapté un tube de verre qui se relève verticalement. Quand on verse de l'eau dans le vase, elle se répand en

montant dans le tube de verre, en passant par le tuyau horizontal qui

est commun aux deux vases. On voit alors que la surface de l'eau dans le vase et la surface de l'eau dans le tube de verre se trouvent à la même hauteur.

On peut aussi vérifier ce principe en versant de l'eau dans deux vases communicants de formes différentes, et en observant que la surface du liquide se trouve à la même hauteur dans les deux vases.

336 PRINCIPES RELATIFS A L'ÉQUILIBRE DES FLUIDES
 le relie au vase; et il est aisé de reconnaître que les surfaces libres sont à un même niveau AB , dans le tube et dans le vase. On enlève le tube de verre, pour le remplacer par un autre d'une forme différente, *fig. 304* ou *305*; on voit que le

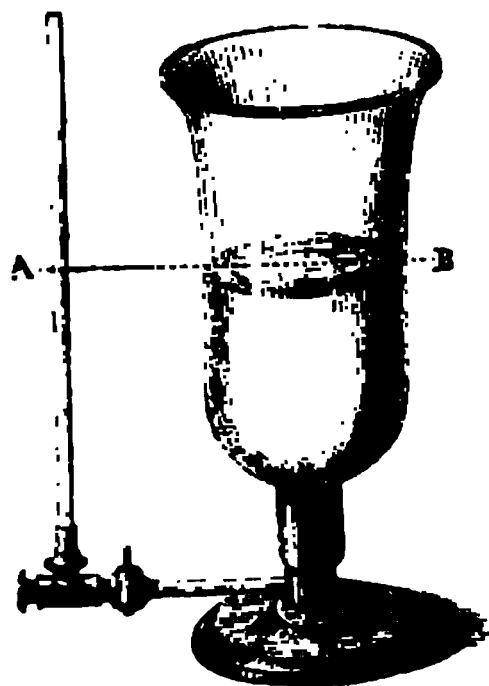


Fig. 303.

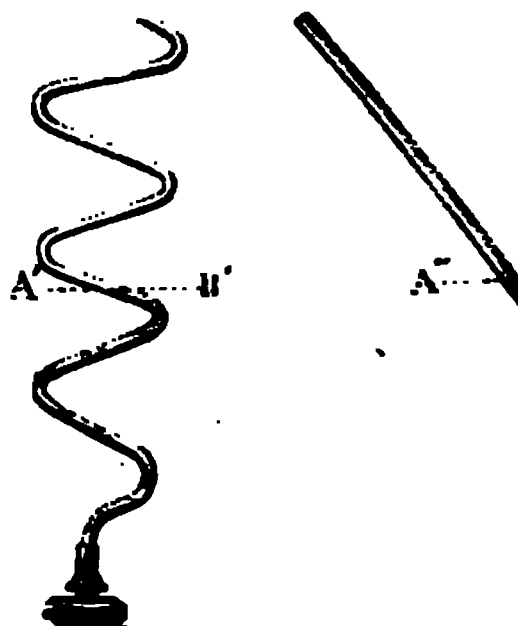


Fig. 304.

l'eau $A'B'$, ou $A''B''$, est toujours si prolongement de la surface libre du vase. Un robinet, placé sur le tuyau, permet d'interrompre ou de rétablir la communication entre le vase et le tube; et facilite ainsi la substitution d'un tube à un autre, sans qu'on ait besoin de vider le vase à chaque fois.

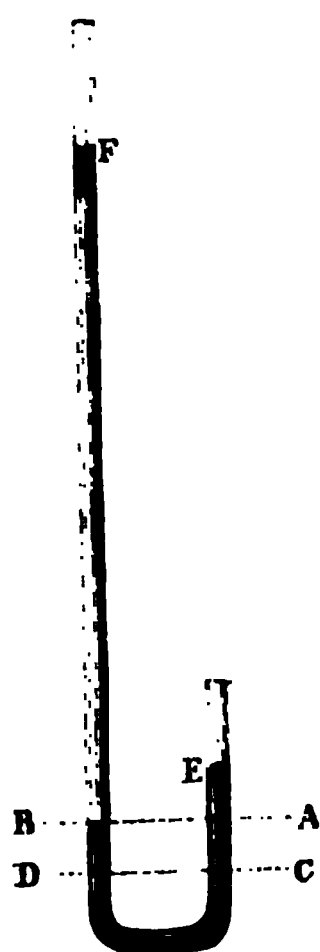


Fig. 306.

§ 229. Lorsque deux liquides de densités différentes, et non susceptibles de se mélanger, sont introduits ensemble dans des vases communiquants, les choses ne se passent pas de la même manière que dans le cas où il n'y a qu'un liquide. Supposons, par exemple, qu'un tube de verre doublement recourbé et ouvert à ses deux extrémités, et étant placé comme l'indique la *fig. 306*, on verse du mercure : ce liquide se répartira dans la partie horizontale et dans les deux branches verticales, s'y sera mis en équilibre, et les surfaces libres, dans ces deux branches, auront été au même

niveau.

ite versé de l'eau dans la branche de gauche, cette ant sur le mercure, a dû le faire passer en partie dans droite, où son niveau se sera élevé. Mais, lorsque établi, la surface libre de l'eau dans la branche de trouve pas au même niveau que celle du mercure he de droite ; ces deux surfaces doivent au contraire des hauteurs très différentes, ainsi que nous allons le

examinons les pressions qui ont lieu, dans l'une et ie, sur le plan horizontal AB, qui passe par la sur- ation des deux liquides. L'équilibre du mercure exige on soit la même pour tous les points situés sur un même al CD inférieur à AB ; car s'il n'en était pas ainsi, le du dans la portion du tube qui fait communiquer les s serait inégalement pressé en des points situés sur an horizontal, ce qui est impossible. Cette égalité de ir tous les points d'un plan horizontal quelconque CD, ntre que du mercure dans les deux branches, aura en- r celui de tous ces plans qui est le plus élevé, c'est-à- plan AB. Il n'en serait plus de même pour un plan périeur à AB, c'est-à-dire pour un plan qui rencontre- ure dans la branche de droite, et de l'eau dans la bran- ie. Observons maintenant que la pression qui s'exerce du plan AB, dans la branche de droite, est égale au lindre de mercure qui aurait pour base l'unité de sur- hauteur la distance verticale de la surface libre E du dessus du plan AB ; et que, de même, la pression qui n des points de ce plan, dans la branche de gauche, est ls d'un cylindre d'eau ayant pour base l'unité de sur- hauteur la distance verticale de la surface libre F de us du même plan AB. Puisque ces pressions doivent l en résulte que les poids des deux cylindres de mer- doivent être égaux, ce qui ne peut avoir lieu qu'autant urs de ces cylindres sont inversement proportionnelles des liquides qu'ils contiennent. Ainsi, pour l'équilibre, e la surface libre F de l'eau au-dessus du plan AB

liquides, au-dessus du plan horizontal qui passe par leur séparation, soient inversement proportionnelles aux densités des deux liquides.

§ 230. **Liquides soumis à des forces quelconques**
 molécules d'un liquide ne sont pas soumises à la seule action pesanteur, outre les forces moléculaires qui existent toujours. Les circonstances qui accompagnent l'équilibre du liquide seront différentes de celles que nous avons trouvées jusqu'à présent. Elles ne varieront pas de la même manière, quand on passe d'un point à un autre de la masse liquide; la surface libre du liquide n'aura pas la même forme. Occupons-nous spécialement de la surface libre, et voyons à quelles conditions elle doit se conformer.

Soit A, fig. 367, une molécule prise sur la surface libre d'un liquide soumis à des forces quelconques. Ce que nous avons composé en une seule et unique force qui agissent sur cette molécule, nous le prendrions pour la résultante des forces moléculaires, et que la résultante de toutes ces forces soit dirigée suivant la ligne AB. Si la portion de la surface libre du liquide qui avoisine le point A, portion qu'on peut supposer plane, n'est pas perpendiculaire à AB, le liquide ne pourra pas être en équilibre.

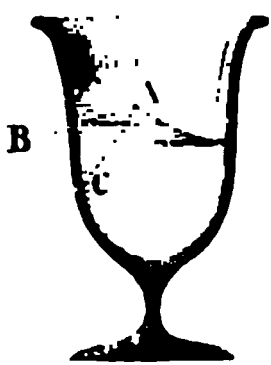


Fig. 367.

En effet, pour que le liquide fût en équilibre, il faudrait que la force dont nous venons de parler, qui agit suivant la ligne AB, fût détruite par la résultante des actions moléculaires auxquelles la molécule A est soumise. Cette résultante des actions moléculaires est dirigée suivant la ligne AC, perpendiculaire à la surface libre (§ 219). Si donc la force qui agit suivant AB était décomposée en une force dirigée suivant AB et une autre force perpendiculaire à la première, la composante dirigée suivant AC pourrait seule être détruite par l'action des forces moléculaires; et l'autre composante ferait nécessairement passer la molécule A, sur la surface libre, pour l'amener dans une autre position. Ainsi l'équilibre ne pourra pas exister, tant que la résultante des forces, auxquelles est soumise chaque molécule sur la surface libre, ne sera pas dirigée perpendiculairement à la surface. Si, au contraire, cette résultante est dirigée perpendiculairement à la surface libre, on conçoit que l'équilibre puisse exister; puisque cette résultante, tendant à faire pénétrer la molécule dans l'intérieur de la masse liquide, déterminera le développement de certaines forces moléculaires, dont l'ensemble pourra

plètement à la production de ce mouvement, en donnant lieu à une résultante égale et de sens contraire.

§ 231. Nous pouvons donner, comme application de ce qui précède, l'exemple d'un vase qui contient de l'eau, et qui est animé d'un mouvement uniforme de rotation autour d'un axe vertical AB.

§ 232. Le mouvement peut être communiqué au vase, comme le représente la figure,

aide d'une poulie C et d'une corde qui passe par la poulie D, dans laquelle on enroule une corde fin. Pen-
le mouve-
chaque
sule du li-
est sou-
d'une part
poids, d'u-
tre part à
force cen-

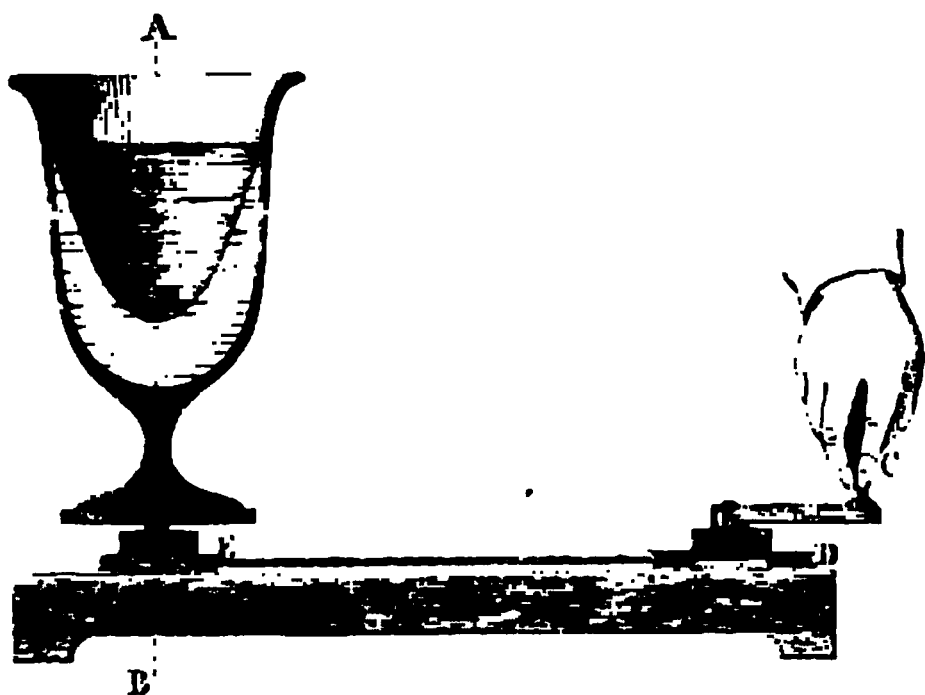


Fig. 208.

ge dirigée horizontalement, et tendant à l'éloigner de l'axe AB.

§ 233. Si on compose ces deux forces en une seule, on trouvera une résultante oblique, située dans un plan passant par l'axe AB. Il faudra donc, pour l'équilibre du liquide, que sa surface libre ne reste plane et horizontale; mais qu'elle se déforme, comme l'indique la figure, afin qu'en chacun de ses points elle soit perpendiculaire à la résultante des deux forces appliquées à la molécule liquide.

§ 234. La surface deviendra concave, par l'effet du mouvement de rotation, et sa concavité sera d'autant plus prononcée que le mouvement sera plus rapide; la ligne courbe, suivant laquelle cette surface sera coupée par un plan quelconque passant par l'axe AB, aura la forme d'une parabole (§ 104.).

§ 235. La figure que présente la surface de la terre dans son ensemble, abstraction faite des aspérités du sol, est un autre exemple remarquable que l'on peut donner comme application du principe.

§ 236. Tout porte à croire qu'à une époque très reculée, la masse entière de la terre était liquide, et que c'est par un refroidissement progressif que sa surface s'est solidifiée, et est ainsi parvenue à l'état que nous lui connaissons. Cette masse liquide, si elle n'avait été animée d'un mouvement de rotation, aurait naturellement

pris la figure d'une sphère, en raison de l'attraction mutuelle qu'exercent entre ses diverses molécules, et qui tendait à les rapprocher le plus possible les unes des autres. Les matières hétérogènes de différentes densités qui en faisaient partie se seraient distribuées régulièrement tout autour de son centre, en couches concentriques : et la résultante de toutes les attractions qu'une molécule de la surface aurait été soumise, de la part des autres molécules, aurait été dirigée perpendiculairement à cette surface, puisqu'elle aurait nécessairement passé par le centre de masse. Mais le mouvement de rotation de la terre autour de ses pôles l'a empêchée de prendre cette forme sphérique en effectuant qu'un pareil mouvement, en vertu duquel chaque point décrit une circonférence de cercle dans l'espace d'environ 24 heures, en développant d'une force centrifuge AB, fig. 3



Fig. 309.

chaque molécule non située sur l'axe de rotation PP'; et cette force se compose avec la résultante des attractions que la molécule éprouve de la part des autres, et oblige ainsi la surface à prendre une autre forme que si la résultante AC seule agissait. Si la surface était restée la même que dans le cas où le mouvement de rotation n'eût pas existé, la force AC aurait été dirigée vers le centre O, et la résultante AD des deux forces n'aurait pas été dirigée vers le centre : donc elle n'aurait

été perpendiculaire à la surface libre du liquide, ce qui ne peut avoir lieu. Ainsi, par suite de l'action des forces centrifuges, qui résultent du mouvement de rotation, développées dans les diverses molécules situées sur l'axe, la surface a dû s'aplatir dans le sens des pôles, et se renfler dans le voisinage de l'équateur, pour prendre une forme telle que l'indique la ligne ponctuée *mm'*, tout en restant beaucoup

La surface de la terre, étant solidifiée peu à peu par le refroidissement, la croûte solide qui s'est ainsi formée ne conserve, au premier abord, la figure aplatie qu'avait la surface lorsqu'elle était fluide. Quant aux eaux de la mer, qui la recouvrent en grande partie, elles ont dans les mêmes conditions que la masse liquide qui

initivement la totalité du globe terrestre : la surface de ces eaux est également aplatie vers les pôles, et renflée vers l'équateur. Si la terre cessait de tourner autour de son axe, et que sa croûte solide n'échangeât pas de forme, les eaux de la mer se retireraient du voisinage de l'équateur, et viendraient s'accumuler vers les pôles, et de se rapprocher de la figure sphérique.

233. La verticale, dont la direction est déterminée par le fil à plomb (§ 97), est la ligne suivant laquelle agit sur un corps la force que nous avons nommée le *poids* de ce corps. Cette force est la résultante des attractions que toutes les molécules de la terre exercent sur le corps, et de la force centrifuge à laquelle il est soumis en raison du mouvement de rotation de la terre. Il résulte de ce qui a été dit dans le § 230, que la verticale doit être perpendiculaire à la surface des eaux tranquilles, en chaque point de cette surface. Or, nous avons dit que la surface libre d'un liquide pesant en équilibre devait être plane et horizontale (§§ 218 et 219), nous nous sommes supposé implicitement que les verticales menées par les différents points de cette surface pouvaient être regardées comme parallèles entre elles. Si l'étendue de la surface du liquide est assez grande pour qu'on ne puisse plus regarder les verticales menées par ses différents points comme parallèles entre elles, on ne pourra plus dire que cette surface soit plane; mais on dira qu'elle est perpendiculaire à la verticale. C'est ainsi que la surface d'un liquide présente une courbure très sensible.

Si des causes extérieures venaient à faire varier la direction du fil à plomb en un même lieu, la direction de la surface des eaux tranquilles dans ce lieu varierait en conséquence. Or, c'est précisément ce qui arrive tous les jours, par suite des attractions que le soleil et la lune exercent sur les corps placés à la surface de la terre. D'après les découvertes faites par Newton, deux corps placés dans l'espace, à telle distance qu'on voudra l'un de l'autre, s'attirent proportionnellement à leurs masses et en raison inverse du carré de leur distance. Le soleil et la lune attirent donc constamment vers eux le corps pesant qui est suspendu à l'extrémité inférieure d'un fil à plomb, tout aussi bien qu'ils attirent la terre. Ces attractions, combinées avec celles que ces deux astres exercent en même temps sur la terre, font que le fil à plomb ne se trouve pas dans les mêmes conditions que si ces astres n'existaient pas : la direction du fil à plomb est un peu différente de ce qu'elle serait, si le corps pesant suspendu au fil était soumis seulement à l'attraction de la terre, et à la force centrifuge qui résulte de son mouvement de rotation. Mais le soleil et la lune ne sont pas toujours placés de la même manière

342 PRINCIPES RELATIFS A L'ÉQUILIBRE DES FLUIDES

par rapport au fil à plomb : tantôt ils sont situés tous deux à l'est ou tous deux à l'occident ; tantôt ils se trouvent l'un d'un côté de l'autre : chacun de ces astres change constamment de place dans l'espace d'une journée. Il en résulte que leur influence sur le fil à plomb le fait dévier de sa direction naturelle, tantôt d'un côté, tantôt de l'autre, et cela périodiquement.

Les changements de direction qu'éprouve le fil à plomb à différentes heures d'une même journée, en vertu des actions de ces astres, venons de parler, sont tellement faibles, que l'observation attentive n'en ferait pas reconnaître directement l'existence sur la surface des eaux tranquilles, qui doit toujours être perpendiculaire au fil à plomb, doit participer à ses oscillations : elle doit s'incliner dans un sens, tantôt s'incliner en sens contraire. La surface de l'eau dans un lac doit, par exemple, s'élever et s'abaisser successivement sur un de ses bords, tandis qu'il s'abaisse et s'élève au même temps sur le bord opposé. Mais ce mouvement d'oscillation de la surface de l'eau est encore presque insensible, quand on considère une petite étendue d'eau, telle qu'un lac ; et les mouvements accidentels dus aux agitations de l'air s'opposent à ce que l'on en constater l'existence. Ce n'est que dans les grandes mers que le mouvement oscillatoire de la surface, correspondant aux changements périodiques de direction du fil à plomb, peut devenir tout sensible : c'est ce qui constitue le phénomène des *marées*. Sur les côtes on voit la surface de la mer s'élever et s'abaisser successivement deux fois dans l'espace d'environ 25 heures. Ces mouvements de reflux sont dus aux changements d'inclinaison qu'éprouve périodiquement la surface de la mer, par suite des actions du soleil et de la lune sur le fil à plomb. Aux époques de pleine lune et de nouvelle lune, les effets de l'action simultanée des deux astres s'ajoutent, c'est alors qu'ont lieu les grandes marées. Aux époques du premier et du dernier quartier, au contraire, les actions du soleil et de la lune se contrarient, et les marées sont beaucoup moins fortes.

§ 234. **Capillarité.** — Lorsqu'on examine attentivement la surface de l'eau contenue dans un vase de verre, on reconnaît que cette surface est bien plane dans presque toute son étendue ; que, tout près des parois du vase, elle se relève d'une manière prononcée. Nous allons voir à quoi tient cette espèce d'adhésion qui semble être en contradiction avec ce que nous avons dit précédemment à la surface libre d'un liquide pesant.

Lorsque nous avons démontré (§ 219) que la surface libre d'un liquide pesant doit être plane et horizontale, nous avons dit que la résultante des actions qu'une molécule, située à la surface, éprouve

de molécules voisines, était dirigée suivant une ligne perpendiculaire à cette surface. Mais cela n'est vrai qu'autant que la molécule n'est pas très rapprochée de la paroi du vase qui contient le liquide, et les conséquences que nous en avons déduites ne s'appliquent que pour les points de la surface qui satisfont à cette condition.

Examinons maintenant comment la proximité des parois peut influer sur la forme libre du liquide. Nous supposerons, pour cela, que la surface du liquide est plane et horizontale jusqu'à la paroi même, *fig. 310*, et nous chercherons si le liquide peut être en cet état sans en conservant cette disposition.

Soit pris sur la surface du liquide, tout près de la paroi du vase, un point *A*. Décrivons autour de ce point comme centre, une surface sphérique qui passe par toutes les molécules qui peuvent exercer une action sur la molécule située en *A*. Soit comprise à l'intérieur de cette sphère la portion *m* du liquide, et la portion *n* de la paroi.



Fig. 310.

La résultante des actions moléculaires exercées sur la molécule *A* sera ce que l'on nomme la *sphère d'activité* de la molécule *A*.

Si cette sphère ne comprenait que des molécules liquides, on pourrait dire, comme nous l'avons fait (§ 219), que la résultante des actions moléculaires appliquées au point *A* est dirigée perpendiculairement à la surface du liquide en ce point. Mais le point *A* étant situé très près de la paroi, la sphère d'activité pénètre dans la matière qui la compose, et la molécule *A* est soumise à la fois aux actions exercées par les molécules liquides, et des molécules de la paroi.

Si la sphère d'activité est assez petite pour que la portion *m* du liquide et la portion *n* de la paroi soient comprises à l'intérieur de cette sphère, la symétrie est détruite, et l'on ne peut plus dire que la résultante des actions moléculaires appliquées au point *A* soit perpendiculaire à la surface du liquide, c'est-à-dire verticale, puisque nous avons supposé que la surface était horizontale. La résultante des actions moléculaires exercées sur la molécule *A* sera donc dirigée suivant une ligne qui ne sera plus perpendiculaire à la surface du liquide.

Supposons que la portion de paroi qui est située dans la sphère d'activité du point *A* soit terminée par une face plane et verticale, qui représente la paroi du vase. Imaginons de plus que nous traçons dans le liquide, à gauche du point *A*, un plan vertical qui soit parallèle à la face plane de la paroi dont nous venons de parler, et qui soit placé d'ailleurs que le point *A* soit également distant de ce plan et de la paroi. Le liquide contenu à l'intérieur de la sphère d'activité du point *A* se trouvera divisé en deux portions : la portion *m* du liquide, et la portion *n* de la paroi, qui agissent sur la molécule *A* avec des forces égales. La résultante des actions moléculaires émanant de la portion *m* du liquide sera dirigée perpendiculairement à la face plane de la paroi, c'est-à-dire horizontalement, à cause de la symétrie. La résultante des actions moléculaires émanant de la portion *n* du liquide, et la portion *p* de paroi, qui agissent

344 PRINCIPES RELATIFS A L'ÉQUILIBRE DES FLUIDES

également sur la molécule A, donneront lieu à une résultante qui sera généralement oblique; et l'on conçoit que, selon la position du liquide et celle de la paroi, cette résultante sera dirigée suivant une ligne telle que AB, tantôt suivant une ligne telle que AC. Dans l'un ou l'autre cas, la molécule A sera soumise : 1° à la pesanteur qui est une force verticale; 2° à la résultante verticale des actions moléculaires qui émanent de la partie *m* du liquide; 3° à la résultante oblique des actions moléculaires qui viennent de la partie *p* du liquide, et de la portion *p* de la paroi. Elle ne pourra donc être en équilibre, et par suite la surface du liquide ne restera pas horizontale. Si la troisième de ces forces est dirigée suivant une ligne telle que AB, la molécule A glissera vers la paroi; le liquide s'accumulera dans le voisinage de cette paroi, et sa surface se relèvera, comme le montre la *fig. 311*. Si cette troisième force est dirigée suivant AC, la molécule A s'éloignera de la paroi; le liquide semblera être repoussé par elle, et sa surface s'abaissera, comme le montre la *fig. 312*.

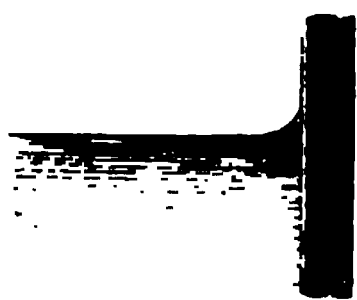


Fig. 311.

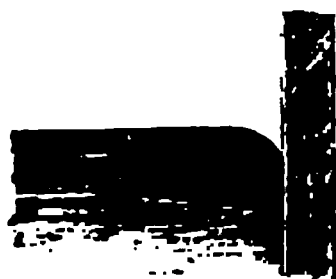


Fig. 312.

C'est le premier de ces deux cas qui se présente, lorsqu'on met de l'eau dans un verre. L'eau se relève vers les bords pour ainsi dire s'attacher aux parois sur lesquelles il en reste d'ailleurs une couche adhérente, lorsqu'on retire l'eau du verre. On se rencontre toutes les fois que l'on verse du liquide dans un vase en mouille les parois.

On voit un exemple du second cas lorsqu'on met du mercure dans un vase en verre. La surface du mercure se déprime dans le voisinage des parois : et lorsqu'on retire le liquide, elles n'en retiennent aucune trace. Cette dépression de la surface du liquide, dans les points très rapprochés de la paroi, se produit toutes les fois que ces parois ne sont pas mouillées par le liquide.

§ 235. Si l'on frotte dans l'eau le bout inférieur de deux verges de verre A, B, *fig. 313*, les faces sont verticales et parallèles, la surface de l'eau se relèvera de part et d'autre des verges, et se rassemblera au milieu, comme le montre la *fig. 313*.

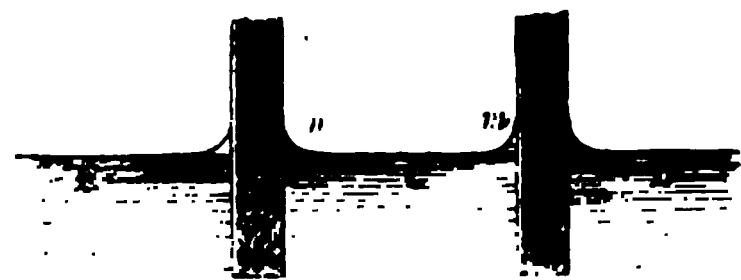


Fig. 313.

parallèles, la surface de l'eau se relèvera de part et d'autre des verges, et se rassemblera au milieu, comme le montre la *fig. 313*.

es deux lames, conformément à ce que nous venons de dire, les deux lames sont convenablement éloignées l'une de l'autre, afin qu'aucune cause qui affectera la surface du liquide, dans le voisinage d'elles, ne sera nullement influencée par la présence de l'autre. Dans ce cas la surface sera plane et horizontale en C, et les deux parties relevées *m*, *n*, et elle se trouvera au même niveau que les autres parties D, E, de la surface, situées en dehors des lames. Mais si, par une cause quelconque, la surface C se trouve élevée à un niveau plus élevé, le liquide monterait en conséquence en *m*. Or, c'est ce qui arrivera, si l'on rapproche les lames, *fig.* 314, de telle manière qu'il n'y ait plus de portion



Fig. 314.



Fig. 315.

ce qui reste plane en C. La partie relevée *m*, se terminant à la surface, vient à une portion de surface qui est elle-même relevée par la lame B, s'élèvera plus haut que quand elle aboutissait à la surface horizontale, qui s'étendait précédemment entre les lames de verre. De même, la partie *n* s'élèvera plus haut que quand elle s'élevait, et cela en raison de la présence de la partie relevée *m*. Ces deux espèces de talus liquides se produisent donc l'un et l'autre, de manière à se maintenir dans des positions plus élevées que lorsqu'ils se produisaient, lorsque les lames étaient plus éloignées. Ainsi le plus bas C, de la surface du liquide compris entre ces deux lames se trouve placé au-dessus du niveau des parties extérieures. On conçoit que, si l'on rapproche encore les lames de verre l'une de l'autre, *fig.* 315, l'effet dont on vient de parler sera encore augmenté, c'est-à-dire que le liquide montera plus haut entre les lames. L'élevation du liquide, qui se produira dans de pareilles circonstances, sera d'autant plus grande que les lames seront plus rapprochées. C'est ce que l'on met bien en évidence, en détruisant le parallélisme des lames, et les faisant se toucher par un de leurs bords, de manière que, tout en restant verticales, elles forment entre elles un angle très-aigu, *fig.* 316 : on voit alors le liquide

346 PRINCIPES RELATIFS A L'ÉQUILIBRE DES FLUIDES

lever dans l'espace angulaire qu'elles comprennent, et
 étant plus qu'il est plus près de l'arête verticale suivant

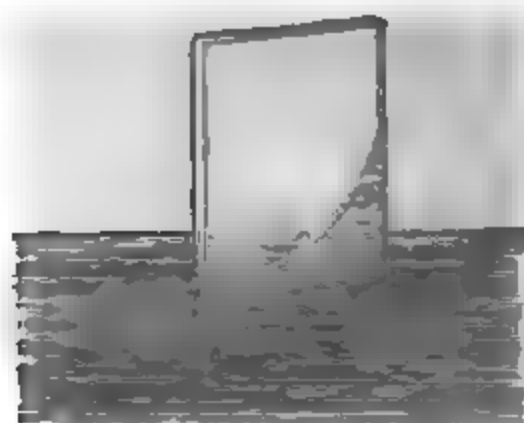


Fig. 316.

elles se touchent, c'est
 d'autant plus qu'il y a
 dans un espace plus
 entre elles.

§ 236. Lorsque de l'eau
 nètre dans un tube
 d'un très petit diamètre
 éprouve de la part de
 du tube une action an
 celle qu'elle éprouvait
 part des deux lames d
 entre lesquelles elle é
 serrée. Cette action de
 tend à maintenir le l

dans le tube, à un niveau supérieur à celui qu'il prendra
 n'existant pas. C'est ainsi que, si l'on prend deux vases co
 quants A, B, fig. 317, dont l'un, A, soit un tube de verre d
 petit diamètre, l'eau que l'on introduira dans le vase B
 dans le tube A jusqu'à un point très notablement plus él

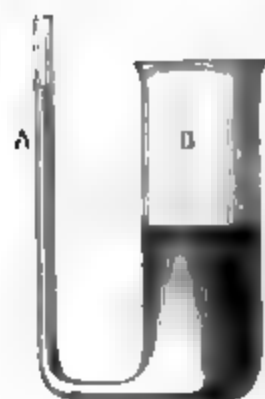


Fig. 317.

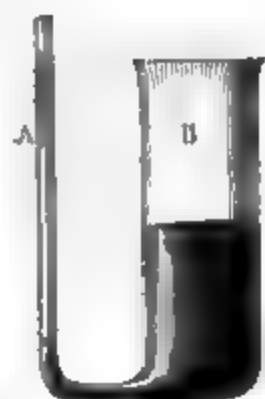


Fig. 318.

la surface libre qui
 minera en B, tandis
 surfaces libres, de
 d'autre, devraient é
 même niveau (§ 231)
 parois avec lesqu
 liquide est en cont
 gissaient pas de m
 modifier ce résultat

Un phénomène a
 mais inverse, se
 lorsqu'on introduit
 eure dans ces mêm

communicants, fig. 318. Le niveau du mercure, dans le tu
 A, se maintient très notablement au-dessous de la surface l
 tale qui le termine dans le vase B tandis que, sans l'ac
 nous examinons en ce moment, le niveau devrait être le m
 part et d'autre.

Les tubes, d'un très petit diamètre, dans lesquels se pr
 ces élévations ou dépressions de liquides, qui semblent en
 diction avec les lois ordinaires de l'équilibre des liquides,

le *tubes capillaires*; ce nom vient de ce qu'on assimile leurs pressions intérieures à celles d'un cheveu. Par suite, on appelle *capillarité* l'ensemble des phénomènes dont nous venons de nous occuper, qui se produisent au contact des liquides et des solides, sont dus aux actions moléculaires qu'éprouvent des molécules situées très près de ces corps solides. La capillarité joue un très grand rôle dans la nature, et pour n'en citer qu'un exemple, il suffit de dire qu'elle contribue beaucoup à l'ascension de la sève dans les végétaux.

§7. Transmission des pressions dans les gaz. — Les gaz possèdent une propriété qui leur est commune avec les liquides : c'est la grande mobilité de leurs molécules, les unes par rapport aux autres. Mais il existe entre eux une différence essentielle. Une masse gazeuse est presque incompressible : quelque grand que soit l'effort

qu'on lui applique, pour lui faire occuper un espace plus petit, la diminution de volume qui en résulte est à peine sensible. Une masse gazeuse, au contraire, cède facilement à l'action de l'effort qu'on veut lui faire appliquer, et se comprime : son volume se réduit à la moitié, au tiers, au quart de ce qu'il était précédemment, suivant que cet effort est plus ou moins grand. Si ensuite l'effort disparaît, le gaz reprend son volume primitif. De plus, si une masse gazeuse est contenue dans un vase fermé, et que la capacité du vase vienne à s'accroître de manière quelconque, le gaz se dilate aussitôt, pour occuper l'espace qui lui est offert.

La plupart des résultats auxquels nous sommes parvenus, relativement aux pressions dans les liquides, conviennent également aux gaz, en raison de la mobilité des molécules, qui est commune aux uns et aux autres. Mais la compressibilité et l'élasticité des gaz font que plusieurs de ces résultats ont besoin d'être modifiés, pour leur être applicables. Nous allons les passer en revue, afin d'indiquer en quoi consistent ces modifications.

Considérons d'abord une masse gazeuse, contenue dans un vase fermé, et dont les diverses molécules ne soient soumises qu'à leurs pressions mutuelles. Ce gaz se trouvera dans les mêmes conditions que le liquide dont nous nous sommes occupés dans les paragraphes 1^{er} à 210. Une seule différence devra être apportée aux considérations employées alors, pour qu'elles puissent convenir à notre masse gazeuse. Dans le cas d'un liquide, on pouvait appliquer telle force qu'on voulait à l'un des pistons qui remplaçaient des portions de vase ; et l'équilibre pouvait toujours exister, pourvu que les forces appliquées aux autres pistons eussent un rapport convenable avec la première. Dans le cas d'un gaz, au contraire, la force qui doit

348 PRINCIPES RELATIFS A L'EQUILIBRE DES FLUIDES.

être appliquée à chacun de ces pistons est entièrement déterminée par la force expansive du gaz. Si cette force n'était pas assez grande, le gaz repousserait le piston et sortirait : si elle était trop grande, le gaz se comprimerait, et le piston pénétrerait dans le vase. En tenant compte de cette différence, due à la compressibilité et à l'élasticité du gaz, et reprenant les raisonnements contenus dans les paragraphes 206 à 210, on arrivera aux conséquences suivantes.

1° Si une masse gazeuse est contenue dans un vase, et que deux pistons A, B, *fig. 277* (page 314), ferment exactement deux ouvertures pratiquées dans la paroi de ce vase, les forces qui devront être appliquées à ces deux pistons, pour maintenir le gaz en équilibre, seront entre elles comme les surfaces de ces deux pistons.

2° Si une masse gazeuse est contenue dans un vase fermé, les pressions que le gaz exerce sur diverses portions de la paroi du vase, en vertu de sa force expansive, sont proportionnelles aux étendues de ces portions de parois.

3° Si par un point A, pris à l'intérieur d'une masse gazeuse en équilibre, on mène différents plans, les pressions supportées par ces plans, et rapportées à l'unité de surface, seront toutes égales entre elles : chacune de ces pressions sera ce que l'on nomme la pression au point A. Elle sera la même que la pression supportée par une portion quelconque de la paroi du vase, et rapportée à l'unité de surface.

§ 238. **Les gaz sont pesants.** — Nous avons supposé, dans ce qui précède, que les molécules gazeuses n'étaient soumises qu'à leurs actions mutuelles : mais il n'en est jamais ainsi. Les gaz sont pesants, tout aussi bien que les liquides : et l'action de la pesanteur sur leurs molécules modifie les résultats que nous avons obtenus en n'en tenant pas compte.

Voyons d'abord comment on peut reconnaître qu'en effet les gaz sont pesants : car il n'est pas possible de s'en assurer de la même manière que pour les corps solides ou liquides : quand on abandonne une masse gazeuse à elle-même, on ne la voit pas tomber comme ces autres corps. L'expérience qui démontre que l'air, par exemple, est pesant, est bien simple. On prend un grand ballon de verre *fig. 319*, dont le col est garni d'une monture de cuivre munie d'un robinet B. Cette monture de cuivre porte en outre intérieurement un pas de vis, à l'aide duquel on peut fixer le ballon au centre de la platine d'une machine pneumatique, comme le montre *fig. 319*. Lorsque le ballon n'est pas fixé de cette manière, on peut l'adapter à sa monture de cuivre, à l'aide du même pas de vis, à un petit crochet C, qui sert à le suspendre au-dessous du plateau d'une

ce, fig. 320. Le robinet étant ouvert, et par le ballon étant plein, on visse le crochet de la monture; puis, à avoir suspendu le au plateau de la balance, on établit l'équilibre en mettant des poids sur l'autre plateau. Cela on dévisse le crochet et adapte le ballon à machine pneumatique.

349, et en maintenant cours le robinet B ouvert, on fait agir cette machine. L'air sort du ballon en quantité de plus en plus grande, à mesure que la machine fonctionne. Lorsqu'il n'en reste que très peu, on ferme le robinet B, on déballe le ballon de la machine pneumatique, on adapte de nouveau le crochet C, et on le suspend comme précédemment au plateau de la balance. On voit alors que les poids qui avaient été mis dans le second plateau, pour faire équilibre au ballon, lorsqu'il était plein d'air, se trouvent trop forts pour lui faire encore équilibre, après que l'air en a été retiré en grande partie. Pour établir l'équilibre, on est obligé de mettre un certain poids sur le plateau qui supporte le ballon; ce poids est évi-

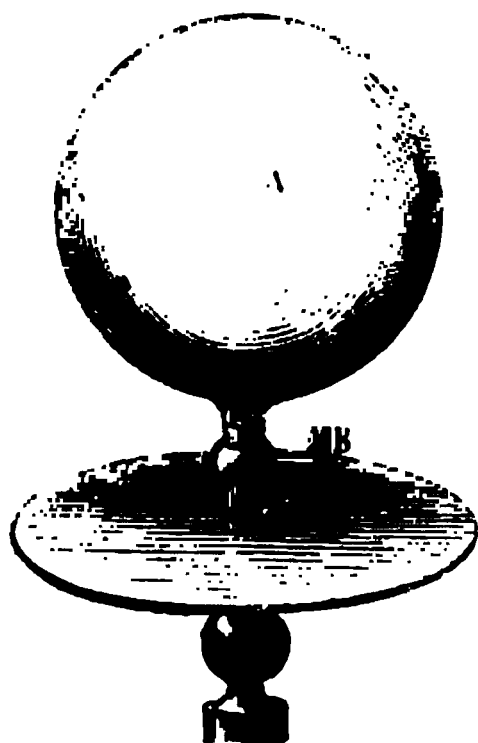


Fig. 319.

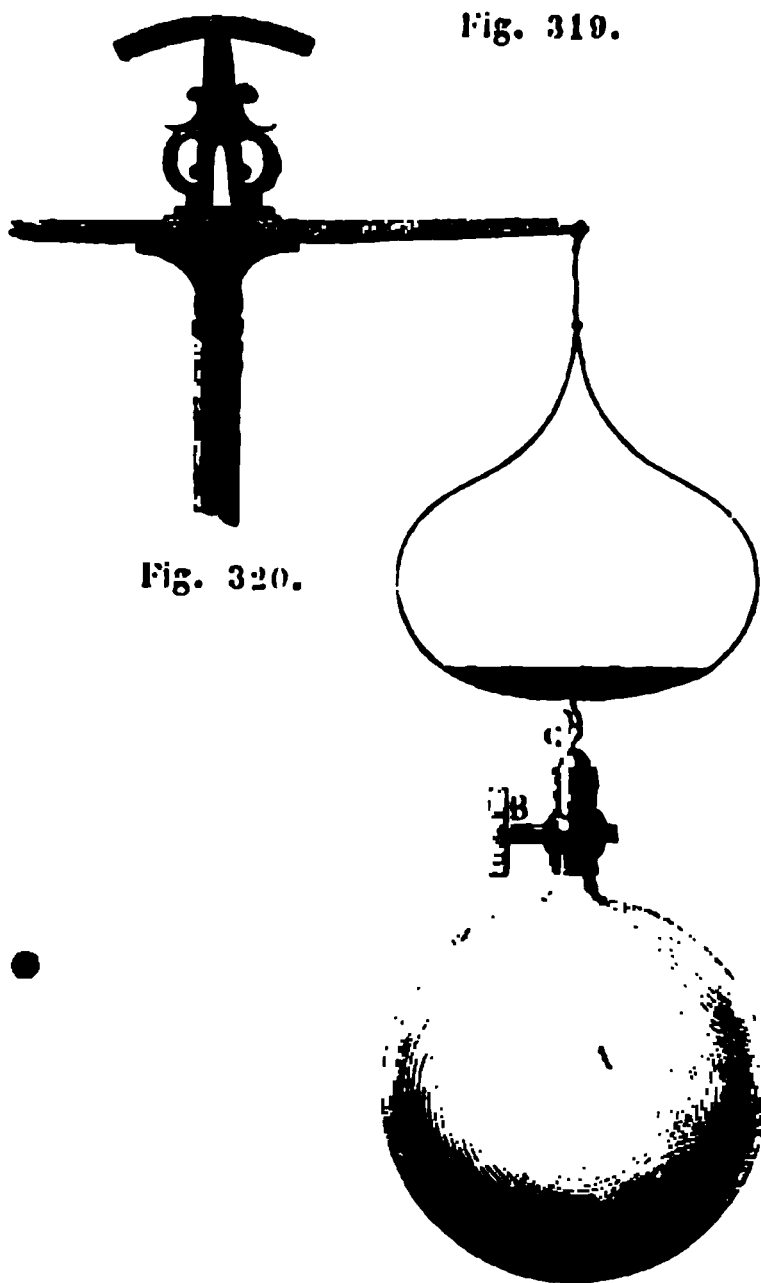


Fig. 320.

350 PRINCIPES RELATIFS A L'ÉQUILIBRE DES FLUIDES

demment le poids de l'air qu'on a fait sortir du ballon. L'air est pesant. Il en est de même de tous les autres gaz, pour lesquels on peut faire une expérience analogue, mais qui présente des difficultés de plus.

§ 239. **Pressions dans les gaz pesants.** — En appliquant les raisonnements qui ont été faits sur les liquides pesants dans les paragraphes 214 à 216, et tenant compte de la compressibilité et de l'élasticité des gaz, on arrivera aux résultats suivants :

1° Dans une masse gazeuse pesante en équilibre, les pressions supportées par de très petites portions de plans, d'égale surface, passant toutes par un même point A pris à l'intérieur du gaz, sont égales entre elles. La pression totale que supporterait une surface de chacun de ces plans, si cette surface était pressée comme elle l'est dans le voisinage du point A, constitue ce qu'on nomme la pression au point A.

2° Dans une masse gazeuse pesante en équilibre, la pression est la même pour tous les points situés sur un même plan horizontal.

3° La pression en un point d'une masse gazeuse pesante en équilibre est égale à la pression en un autre point situé plus haut que le premier, augmentée du poids du gaz que contiendrait un cylindre vertical, compris entre les plans horizontaux qui passent par ces deux points, et ayant pour base l'unité de surface.

4° La pression exercée par un gaz pesant en équilibre sur un point de la paroi du vase qui le contient, est égale à la pression exercée en un autre point de cette paroi, situé plus haut que le premier, augmentée du poids du gaz que contiendrait un cylindre vertical, compris entre les plans horizontaux qui passent par ces deux points, et ayant pour base l'unité de surface.

Le poids de l'unité de volume d'un gaz est tellement faible en comparaison avec les pressions qu'il exerce habituellement, que sa force expansive, contre les surfaces avec lesquelles il est en contact, que la plupart du temps, quand on n'a pas à faire avec une masse gazeuse très étendue, on peut faire abstraction de ses molécules. Alors le gaz rentre dans les conditions que nous avons supposées placées dans le § 237, et les résultats que nous avons énoncés dans ce paragraphe deviennent applicables.

§ 240. L'incompressibilité presque absolue des liquides permet de regarder les diverses parties d'une masse liquide en équilibre comme ayant la même densité. Il n'en est pas rigoureusement ainsi : puisque, les parties inférieures du liquide étant plus fortement pressées que les parties supérieures, les molécules tendent à être plus rapprochées dans les premières que dans les

volume doit comprendre un plus grand nombre de molécules, à mesure que ce volume est pris plus bas dans la masse. Mais la différence est tellement faible, que l'on ne remarque rien de sensible, en admettant que les molécules sont également réparties les unes des autres dans toute l'étendue de la masse gazeuse ; en d'autres termes, que la densité est la même partout. Ce n'est pas de même des gaz. Leur grande compressibilité fait qu'une légère différence de pression, entre deux points d'une même masse en équilibre, détermine une différence appréciable des densités du gaz en ces deux points : la densité est d'autant plus grande que la pression est plus forte. Aussi, dans une masse gazeuse en équilibre, la densité va-t-elle constamment en augmentant depuis la partie supérieure jusqu'à la partie inférieure. Elle n'étant la même pour tous les points situés sur un même plan horizontal, la densité doit également être la même pour ces différentes tranches. Si l'on imagine que toute la masse gazeuse soit divisée en tranches, par un grand nombre de plans horizontaux, menés à une distance très petite les uns des autres, on pourra regarder chaque tranche comme étant la même dans toute l'étendue de chacune d'elles ; la densité ira au contraire en augmentant, quand on passe d'une tranche à une autre située au-dessous de la première. La masse gazeuse pourra ainsi être assimilée à un ensemble de couches pesantes de densités différentes, qui se superposent dans la même direction, et qui sont séparées les uns des autres par des surfaces horizontales.

On dit (§ 239) que la différence des pressions en deux points d'une même masse gazeuse pesante en équilibre, est égale au poids d'une colonne de gaz qui contiendrait un cylindre vertical compris entre les plans horizontaux qui passent par ces deux points, et ayant pour base la surface qui passe par le point inférieur ; on doit entendre que le gaz contenu dans ce cylindre est pris tel qu'il est dans la masse gazeuse, entre les deux points qui comprennent ce cylindre ; sa densité doit décroître constamment de la base inférieure du cylindre à sa base supérieure. On ne peut donc pas avoir le poids d'un pareil cylindre de gaz, s'il s'agit d'un liquide, en multipliant le poids de l'unité de volume de gaz par le volume du cylindre (§ 220). Mais quand il s'agit d'un gaz, la différence de hauteur qui n'est pas bien grande, comme la densité du gaz ne varie pas beaucoup dans cette hauteur, on peut avoir le poids du cylindre gazeux, en admettant que la densité est la même dans toute son étendue, et opérant comme s'il s'agissait d'un liquide ; l'erreur commise ainsi sera inappréciable dans la plupart des cas.

354 PRINCIPES RELATIFS A L'ÉQUILIBRE DES FLUIDES.

exerce une pression sur la surface de tout corps avec lequel elle est en contact. Il résulte de ce qui précède que cette pression, rapportée à l'unité de surface, est égale au poids de l'air que contient un cylindre vertical, ayant pour base cette unité de surface, et s'étendant dans toute la hauteur de l'atmosphère. Elle s'exerce également aussi bien sur les corps placés à l'intérieur d'une chambre, que ceux qui sont en plein air : car il existe toujours des communications de l'intérieur de la chambre au dehors, par les cheminées, les joints des portes et des fenêtres, et la pression de l'atmosphère se transmet avec toute son intensité de l'extérieur à l'intérieur. Nous allons indiquer quelques expériences qui mettent en évidence la pression atmosphérique, et qui peuvent donner une idée de sa grandeur.

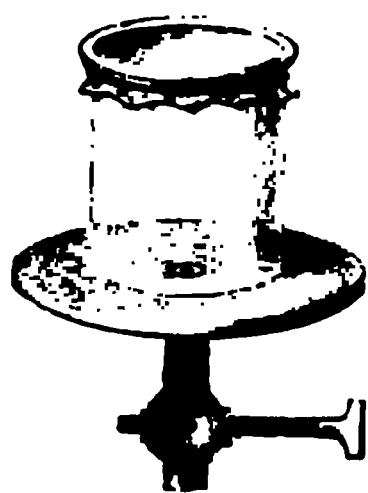


Fig. 321.

On prend un cylindre creux de verre, *fig. 321*, dont on recouvre une des bases à l'aide d'une peau de bœuf que l'on fixe solidement sur son contour. On place ce cylindre sur la platine d'une machine pneumatique, de manière à établir un contact intime entre la surface de cette platine et les bords de la seconde base du cylindre. Les bords ont été préalablement usés pour satisfaire à cette condition. Si alors on retire l'air de l'intérieur du cylindre de verre, en faisant manœuvrer la machine, on voit que la peau de bœuf se déforme ; de plane qu'elle était, elle devient concave. Avant qu'on ait placé le cylindre sur la machine pneumatique, la peau de bœuf est également pressée, sur ses deux faces, par l'air atmosphérique qui s'étendait librement de l'une à l'autre. Mais, dès qu'on a retiré une partie de l'air qui était à l'intérieur du cylindre, l'air restant exerce une si grande pression que précédemment sur la surface inférieure de la peau, la pression supérieure n'est plus balancée : la peau fléchit sous cette pression, qui, à mesure que le vide s'opère, approche de plus en plus d'être égale au poids de la colonne d'air, qui aurait pour base l'ouverture du cylindre et s'élèverait jusqu'à la limite de l'atmosphère. Lorsque la peau est ainsi fortement tendue sous le poids considérable qu'elle supporte, il suffit de la toucher légèrement avec un corps solide, pour qu'elle se déchire avec fracas, en laissant rentrer l'air dans l'espace où l'on avait fait le vide.

Une autre expérience consiste à rapprocher l'un de l'autre deux hémisphères creux de bronze, *fig. 322*, de manière à établir un contact intime entre leurs surfaces intérieures.

entre leurs bords, et à faire le vide dans l'espace intérieur. Pour cela, l'un des deux hémisphères est conduit, dont l'extrémité est garnie d'un filet de vis, à l'aide duquel on le fixe au centre de la machine pneumatique. On marche; l'air contenu à l'intérieur des hémisphères sort par le conduit, et on juge que le vide est suffisant, on ferme un robinet adapté à la machine, afin d'empêcher que l'air ne rentre. On aura détaché les hémisphères de la machine pneumatique. Si l'on cherche à séparer les deux hémisphères l'un de l'autre, on éprouve une résistance; ils sont comme collés ensemble, ce n'est qu'en leur appliquant une force considérable qu'on peut par-
 isjoindre. Avant qu'on eût fait le vide, chaque hémisphère est également pressé par l'air, intérieurement et extérieurement. Quand le vide a été opéré, les pressions intérieures ayant disparu, la pression extérieure agit presque complètement, les pressions produisent tout leur effet; elles pressent fortement les deux hémisphères l'un contre l'autre, et l'on ne peut les séparer qu'en exerçant sur chacun d'eux des forces de traction capables de vaincre les pressions. Cette expérience a été faite par Otto de Guéricke, évêque de Magdebourg, inventeur de la machine pneumatique; c'est pour lui que les deux hémisphères servent à la faire, portent le nom de *hémisphères de Magdebourg*.

Il nous restera enfin une troisième expérience que tout le monde peut répéter avec la plus grande facilité. On prend un verre à boire, qu'on remplit d'eau; puis on le recouvre avec un papier, et on le retourne sans dessus dessous, en soutenant le papier avec le plat de la main, puis on le retourne, pour le maintenir en contact avec les bords

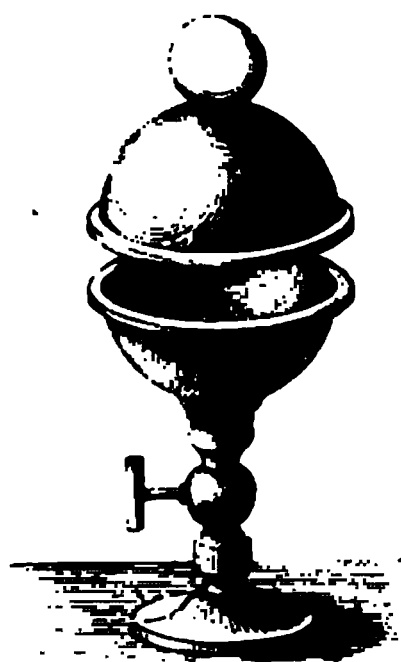


Fig. 322.

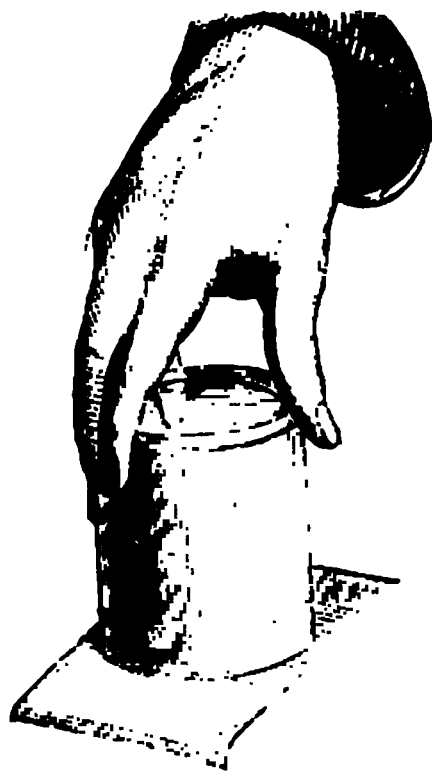


Fig. 323.

356 PRINCIPES RELATIFS A L'ÉQUILIBRE DES FLUIDES.

du verre. Lorsque le verre est retourné, et que la feuille de papier est dans une position bien horizontale, on retire la main qui tenait : on voit alors le liquide se maintenir dans le verre, *fig. 323*, et la feuille de papier reste adhérente au verre, comme si elle y était collée. Si l'eau ne tombe, c'est que la pression atmosphérique la soutient, en agissant en haut, sur la face inférieure de la feuille de papier. Cette expérience est nécessaire pour faire l'expérience : sans elle, la pression qui ne s'exercerait jamais avec une parfaite régularité sur la surface inférieure de la masse d'eau, déterminerait une déviation de cette surface, et tandis que l'air monterait d'un côté, tomberait de l'autre côté.

§ 244. **Baromètre.** — Supposons que l'on introduise une cloche de verre dans un baquet plein d'eau, en la couchant sur son côté pour qu'elle se remplisse, et qu'il ne reste pas d'air à l'intérieur ; puis qu'on la retire en partie de l'eau, en la plaçant de manière que son ouverture, tournée vers le bas, reste tout



Fig. 24.

au-dessous de la surface de l'eau dans le baquet. *fig. 324*, où l'on voit que, dans cette nouvelle position, la cloche restera entièrement pleine d'eau. Les physiciens, qui regardent cela comme étant en accord avec le principe de l'équilibre des fluides dans des vases communiquants (§ 228), l'expliquent en disant que la nature a horreur du vide. On voit, en effet, que si l'on retire la cloche qui est au-dessus de la surface de l'eau du baquet, le baquet serait vide de l'eau si l'eau s'y abaissait jusqu'à la surface de l'eau du baquet, l'air ne pourrait nullement entrer.

C'est la pression atmosphérique, s'exerçant sur la surface de l'eau dans le baquet, qui s'oppose à ce que l'eau de la cloche descende pour se mettre de niveau avec cette surface. Si l'on n'avait pas la pression appliquée à l'eau du baquet, le principe de l'équilibre des fluides dans des vases communiquants exigerait bien que le niveau de l'eau fût le même à l'intérieur et à l'extérieur de la cloche.

sphérique modifie ce résultat, en obligeant le liquide à cloche, au-dessus du ndrait sans elle.

ependant que la pression ne peut faire ainsi le jusqu'à une certaine cloche avait des dimen-

extrêmement grandes,

tiendrait pas dans toute

elle s'abaisserait jusqu'à

ence de niveau, à l'inté-

érieur, fût en rapport

ir de la pression qui en

i, au lieu de prendre de

un liquide plus dense,

e niveau déterminée par

pression extérieure sera

l'autant plus petite que

uide sera plus considé-

résultat peut-il être vé-

ient à l'aide du mercure.

rend un tube de verre

r un bout, et ayant une

ron 90 centimètres; on

plètement de mercure,

t le doigt sur l'extrémité

renverse en plongeant

émité dans un vase con-

ure. Si alors on enlève

spéchait le mercure du

miquer avec celui du

maintienne le tube verti-

nière que la plus grande

neur se trouve au-des-

e libre du mercure dans

maint que le tube ne reste

ent rempli. Le liquide

intérieur, en laissant un

dessus de lui, et il s'ar-

où la différence de ni-

be et dans le vase est

ntimètres, *fig. 325*

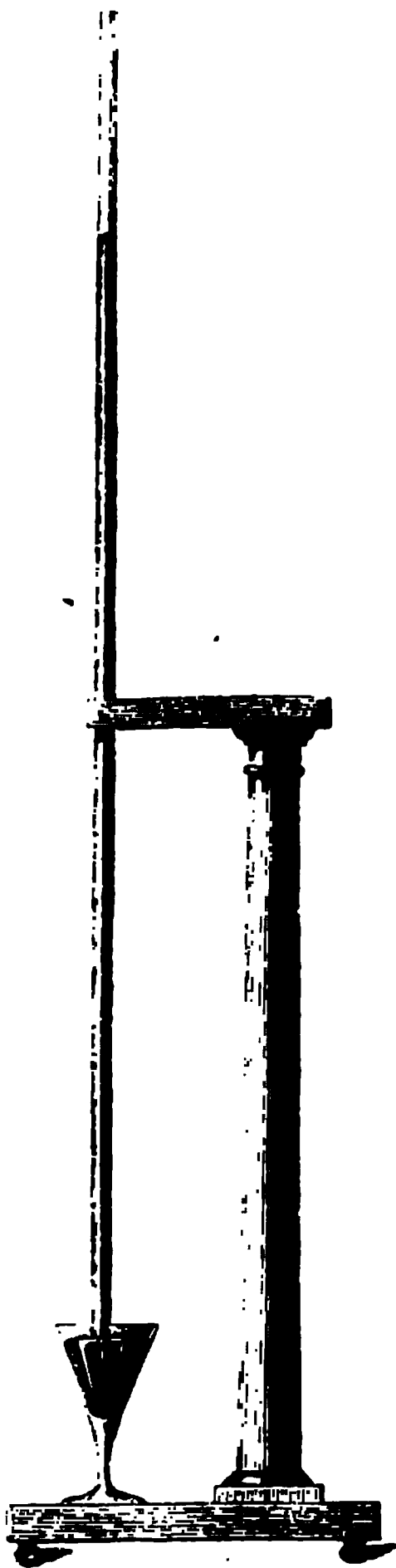


Fig. 325.

à celle qui est exercée au même niveau, à l'intérieur de la colonne de mercure située au-dessus de ce niveau. La pression que l'atmosphère exerce sur 1 centimètre carré de la surface du mercure dans le vase sera donc égale au poids d'un mercure ayant pour base 1 centimètre carré, et pour hauteur 1 centimètre. Le volume de ce cylindre est de 76 centimètres cubes et comme le centimètre cube de mercure pèse 13^m,6, la pression exercée par l'atmosphère sur 1 centimètre carré est de 1 033 grammes, ou 1^k,033.

Il est aisé de voir maintenant jusqu'à quelle hauteur maintenue par la pression atmosphérique, dans une expérience à la précédente, dans laquelle on remplacerait l'air par l'eau. Le cylindre d'eau dont le poids mesurerait dans cette expérience la pression atmosphérique, devant peser autant que le cylindre de mercure dont nous venons de parler, les hauteurs de ces deux cylindres seront inversement proportionnelles aux densités des liquides : en sorte que la hauteur du cylindre d'eau égale à $0^m,76 \times 13,6$ ou bien égale à 10^m,33. La différence de niveau de l'eau, à l'intérieur du tube et à l'extérieur, sera donc la même que celle que nous venons d'indiquer, de 10^m,33.

Si l'on répète l'expérience de Torricelli, à diverses é

égale à celle qu'exercerait une colonne de mercure de hauteur, on dit que cette pression est d'une *atmosphère*. Est de 2, de 3, de 4,... atmosphères, si elle équivaut à la pression d'une colonne de mercure ayant une hauteur 2 fois, 3 fois,... 0^m,76. Le mot *atmosphère* est employé, pour désigner une pression que l'on prend pour terme de comparaison, et qui constitue ainsi une unité particulière, à l'aide de laquelle une pression quelconque pourra être évaluée en nombre. Il faut rappeler qu'une pareille pression d'une atmosphère est représentée par un centimètre carré.

L'appareil représenté par la *fig. 325*, que l'on emploie opérant comme nous l'avons dit, et qui fournit la mesure de la pression atmosphérique, se nomme un *baromètre à cuvette*. On obtient encore un baromètre, en prenant un tube en verre par un bout, et dont l'autre bout est recourbé, remplissant ce tube de mercure, puis le retournant pour le placer comme l'indique la figure, l'extrémité ouverte vers le haut. Aussitôt que le tube est retourné, le mercure baissera dans la grande branche, jusqu'à ce que l'équilibre soit établi, entre la pression atmosphérique, qui s'exerce sur la surface libre du mercure dans la petite branche, et la pression due à la colonne de mercure située dans la grande branche, au-dessus de cette surface libre. Ce baromètre, *fig. 326*, est désigné sous le nom de *baromètre à siphon*, à cause de la forme de sa partie inférieure; celui de la *fig. 325* est un *baromètre à cuvette*.

Les déplacements qu'éprouve, d'un moment à un autre, le niveau des surfaces libres du mercure dans les deux branches, se traduisent par un mouvement de chacune des surfaces. Lorsque cette différence de niveau, qui détermine la hauteur de la colonne barométrique, augmente, le mercure monte dans le tube, et

descend dans la cuvette, ou dans la petite branche ouverte *fig. 326*. Si la hauteur de la colonne barométrique diminue, le mercure descend dans le tube, et monte dans la cuvette. La somme des deux déplacements que prennent en sens contraire les deux surfaces libres du mercure est une quantité dont la hauteur de la colonne barométrique augmente ou diminue; mais ces déplacements peuvent être très différents, suivant que les deux surfaces libres auront des étendues *plus ou moins grandes*, l'une par rapport à l'autre. Supposons que



360 PRINCIPES RELATIFS A L'ÉQUILIBRE DU

le tube barométrique soit peu large dans l'extrémité supérieure de la colonne de mercure, et la cuvette permette à la surface libre du liquide d'occuper une assez grande étendue; on abaisse le tube ne fera passer dans la cuvette qu'une

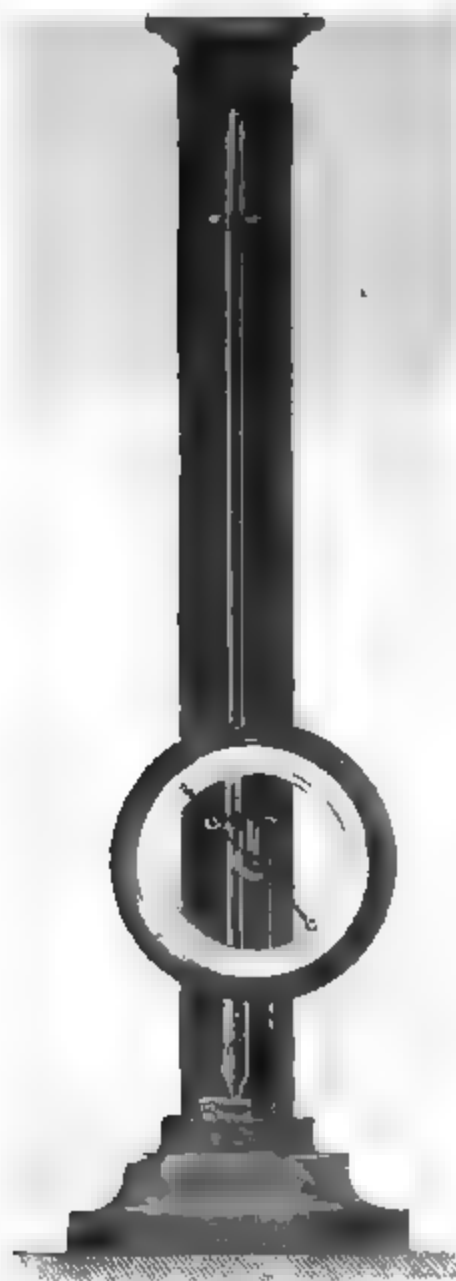


FIG. 327.

liquide qui, se une étendue grande, ne sera libre dans la hauteur insigni surfaces libres, dans la cuvette, due, l'une d'elle que l'autre surface libre est grande dans la cuvette, un abaissement du mercure dans le tube ne fera pas varier la hauteur de la colonne de mercure dans le tube.

Les variations de la hauteur de la colonne de mercure ayant un certain nombre de changements de direction, on a placé à l'intérieur du tube un index à l'usage du baromètre. Dans ce but, on a placé dans la branche ouverte du tube un index qui se déplace avec la colonne de mercure. On a placé à l'extérieur du tube un index qui se déplace avec la colonne de mercure. On a placé à l'extérieur du tube un index qui se déplace avec la colonne de mercure.

On a marqué d'avance à côté du tube.

Pour rendre plus visible la variation qu'éprouve

ométrique, on a imaginé le *baromètre à cadran*, dans les arrangements de niveau du mercure dans la petite branche. Il tient lieu au mouvement d'une aiguille sur un cadran, (Fig. 328). Voici quelle est la disposition de cet appareil. Une petite gorge est fixée à un petit axe horizontal sur lequel elle peut tourner très facilement. Deux petits cylindres d'ivoire sont suspendus aux extrémités de deux fils, dont l'un est attaché en un point de l'une des deux faces d'une poulie : ces deux fils, enroulés en sens contraire l'un de l'autre dans les deux gorges, descendent ensemble, et sont tendus par les poids des deux cylindres d'ivoire. Un de ces deux cylindres, plus lourd, pénètre à l'intérieur de la petite branche du tube et vient reposer sur la surface du mercure qui s'élève ou s'abaisse. Si le mercure s'abaisse dans la petite branche, il y a une augmentation de la hauteur barométrique ; le petit cylindre d'ivoire qui se trouve dans cette branche, étant plus soutenu par le liquide, s'abaisse en faisant tourner la poulie, et faisant en même temps s'élever l'autre cylindre d'ivoire. Mais si le mercure s'élève dans la petite branche, il soulève le cylindre d'ivoire qui y est, et l'autre cylindre descend, et la poulie tourne en sens contraire. Une aiguille, fixée à l'extrémité de l'axe de la poulie, tourne avec elle, et vient correspondre successivement aux indications que porte un cadran concentrique avec le tube. L'aiguille doit être construite de manière à avoir son centre de gravité sur l'axe de la poulie, afin que son poids ne fasse tourner cet axe dans un sens plutôt que dans un autre.



Fig. 328.

D'après les notions générales que nous avons données sur l'atmosphère de la terre (§ 242), il est bien évident que si l'on transporte un baromètre en des points de plus en plus élevés dans cette atmosphère, la hauteur de la colonne barométrique devra diminuer, en raison de la diminution progressive de la pression. L'expérience en a été faite pour la première fois, à la fin du XVII^e siècle, par Pascal, en 1648 : un baromètre ayant été transporté au sommet du Puy-de-Dôme, la hauteur de la colonne barométrique a éprouvé une diminution de 84 millimètres. Le raccourcissement de la colonne barométrique étant d'autant plus grand que la hauteur à laquelle on s'est élevé est plus considérable, on conclut de l'observation du baromètre, faite en divers points, puisse faire connaître les différences de niveau de ces points. C'est ce qui arrive

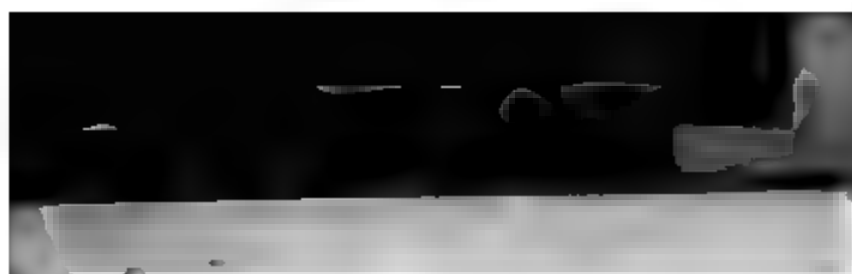
362 PRINCIPES RELATIFS A L'ÉQUILIBRE DES FLUIDES

en effet ; et c'est sur ces considérations qu'est basée la mesure de la hauteur des montagnes par le baromètre.

Dans les circonstances ordinaires de température et de densité atmosphérique, au niveau de la mer, l'air pèse environ 10 472 fois moins qu'une colonne d'eau, à égalité de volume. D'après cela, si l'on s'élève verticalement de 10^m,472, la pression atmosphérique devant supporter le poids d'une colonne d'air de 10^m,472 de hauteur, la colonne barométrique diminue d'une quantité 10 472 fois plus petite, c'est-à-dire d'un millimètre. Une élévation verticale de 4^m seulement produit une diminution d'environ un dixième de millimètre de la colonne de mercure, quantité qui est appréciable. Si l'air avait la même densité à toutes les hauteurs, rien ne serait plus simple que de mesurer la différence de niveau de deux points, à l'aide du baromètre : en supposant que la densité de l'air fût celle qui est indiquée, on n'aurait qu'à multiplier 10^m,472 par le nombre de millimètres dont la colonne barométrique aurait diminué en passant du premier point au second. Mais il n'en est pas ainsi : la densité de l'air décroît progressivement, à mesure qu'on s'élève dans l'atmosphère ; et pour trouver une même diminution de la colonne barométrique, il faut monter de quantités de plus en plus grandes à mesure qu'on est déjà plus élevé au-dessus du niveau de la mer. Une dépression d'un dixième de millimètre dans la colonne de mercure, qui correspond à une élévation d'environ 4^m dans l'atmosphère, au niveau de la mer, ne correspond plus bientôt à une élévation de 2^m, de 3^m, de 4^m,.... De plus, la température varie d'une couche d'air à une autre couche, les densités de ces couches ne sont pas les mêmes que si la température était uniforme dans toute l'atmosphère. D'autres circonstances encore viennent compliquer la question. Cependant on est parvenu à construire des tables d'un usage commode, à l'aide desquelles on détermine assez exactement la différence de niveau de deux points, par des observations de pressions barométriques et de températures, faites en ces deux points. Ces tables sont publiées tous les ans dans l'*Annuaire du bureau des longitudes*.

§ 248. Le baromètre a besoin d'être disposé d'une manière particulière pour se prêter à l'usage que nous venons d'indiquer : il faut qu'il soit facile à transporter, et qu'il permette de déterminer bien exactement la différence de niveau des deux surfaces libres du mercure. C'est la disposition du baromètre de Fortin, qui a été adoptée de manière à satisfaire à ces deux conditions.

Ce baromètre peut être suspendu à la partie supérieure d'un bâtiment.



, *fig. 329*; on le met
tion, quand on vent
vation. Lorsque les
du pied sont rappro-
re à se toucher, elles
intérieur un espace
et le baromètre peut
erte que le pied, étant
ne sorte de fourreau
tir l'instrument pen-

e de Fortin est à cu-
se nous l'avons dit,
du du mercure monte
is le tube, il descend
même temps dans la
ur avoir une mesure
gement qu'a éprouvé
la colonne barométri-
ir compte à la fois de
gements simultanés
is ici le fond de la
ale: il est formé d'une
t le milieu est appuyé
d'une vis
n faisant
is, dans
s l'autre.
position
cuvette,
e niveau
elle con-
done de
te dispo-
mener la
mercure
e à être
incidence
à l'échelle
accompa-
pour que
le la co-



Fig. 330.



Fig. 329.

364 PRINCIPES RELATIFS A L'ÉQUILIBRE DES FLUIDES

l'anneau barométrique soient représentées tout entières par les hauteurs de niveau du mercure dans le tube. Pour faciliter l'observation, la cuvette est munie d'une pointe d'ivoire *b*, qui est exactement au niveau du zéro de l'échelle. On s'assure que le niveau du mercure est bien au niveau de ce zéro, en examinant la pointe d'ivoire, et son image produite par la réflexion de la lumière sur la surface du mercure; la pointe et son image se touchent, sans que la réflexion de la lumière sur la surface du liquide indique la moindre dénivellation de cette surface au zéro de la pointe d'ivoire.

Pour déterminer le point de l'échelle métallique graduée qui correspond au niveau du mercure dans le tube, on se sert du micromètre *c*, *fig.* 329, qui présente deux ouvertures opposées, par lesquelles on observe le mercure dans le tube. On abaisse le micromètre jusqu'à ce que le rayon visuel qui rase les bords intérieurs de ces deux ouvertures vienne toucher le sommet de la colonne de mercure. Un point de repère et un vernier, tracés sur le micromètre, permettent de trouver, sur l'échelle graduée, la valeur numérique de la hauteur de la colonne barométrique, et cela avec une précision d'un dixième de millimètre.

Pour que le résultat obtenu de cette manière soit bien exact, il est indispensable que le tube barométrique soit exactement vertical; car s'il était oblique, l'espace qui y serait occupé par le mercure aurait une longueur plus grande que ce qu'on nomme la hauteur de la colonne barométrique. Cette hauteur est la distance verticale qui sépare les plans horizontaux menés par les deux surfaces du mercure, dans le tube, et dans la cuvette. Aussi le baromètre Fortin se suspend-il au pied qui le supporte, de manière à prendre très facilement la position verticale que tend à lui donner l'action de la pesanteur. Deux petites vis *m*, *m*, *fig.* 331

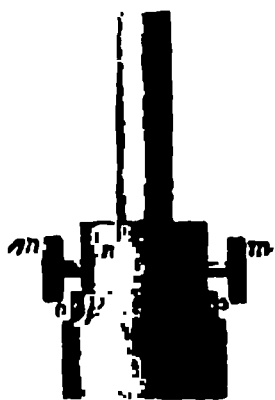


Fig. 331.

sont destinées à fixer la monture métallique du tube; une petite pièce de petit manchon *n* qu'elle traverse est maintenue par deux tourillons *o*, *o*, adaptés au manchon *n* et tournant sur un axe autour duquel le baromètre peut tourner dans une certaine direction; ces tourillons sont dans deux ouvertures d'un anneau qui peut lui-même tourner librement autour d'un autre axe; d'autres tourillons *q*, formant un second axe de suspension, perpendiculaire au premier, permettent de donner à la direction de ces deux axes de suspension, la direction qu'on veut; et cédant à l'action de son poids, il se place verti-

cal; et cédant à l'action de son poids, il se place verti-

fil à plomb. Les petites tiges de fer, *f, f*, *fig. 329*, qui sont attachées aux trois branches du pied, de manière à les maintenir à deux, sont destinées à maintenir ces branches dans des positions relatives invariables, pendant qu'on fait l'observation, et à prévenir ainsi les inconvénients qui pourraient résulter d'un dérangement brusque et accidentel de l'une des

Le baromètre de Gay-Lussac est destiné à atteindre le même but que celui de Fortin. C'est un baromètre à siphon, dans lequel les deux surfaces libres du mercure, ayant la même étendue, se déplacent au même temps de quantités égales, en sens contraire; on a soin de tenir compte des changements de niveau dans les deux branches du baromètre, afin d'en déduire la variation totale de la pression barométrique. Des dispositions particulières, dans le détail desquelles nous n'entrerons pas, permettent d'ailleurs de transporter facilement l'instrument, sans qu'il se dérrange.

1. **Loi de Mariotte.** — Lorsque l'on comprime un gaz, sa densité augmente; les pressions qu'il exerce sur les diverses parties de la paroi qui l'enveloppe croissent à mesure que son volume diminue. Mariotte, en étudiant les changements correspondants de pression et de volume, a reconnu l'existence de la loi qui porte son nom : *La force élastique d'une masse de gaz à température constante reste la même varie en raison inverse du volume qu'elle occupe.* La condition que la température de la masse qu'on considère reste la même, est essentielle, et ne doit pas être passée sous silence. On observe en effet que, lorsqu'on diminue brusquement le volume d'une masse gazeuse, sa température augmente; lorsqu'au contraire on permet à cette masse gazeuse de se dilater, sa température s'abaisse. Pour que les forces élastiques que développe successivement une même masse gazeuse, dont on fera varier le volume, satisfassent à la loi de Mariotte, il est donc nécessaire que ces forces élastiques ne soient mesurées qu'après que le gaz aura eu le temps de reprendre la température qu'il avait d'abord, en se mettant en équilibre de température avec les corps qui l'environnent.

La loi de Mariotte se vérifie facilement de la manière suivante. Prend un tube recourbé, *fig. 332*, dont la petite branche est fermée au haut, tandis que la grande branche est ouverte, et l'on verse, vers la partie inférieure de ce tube, une petite quantité de mercure, que l'on dispose de telle manière qu'il s'élève dans les deux branches à un même niveau *ab*. La masse d'air, qui se trouve enfermée dans la petite branche, supporte la même pression

que l'air extérieur; car le mercure ne peut être en équilibre dans la position indiquée, qu'autant qu'il est soumis à des pressions égales sur ses deux surfaces libres.

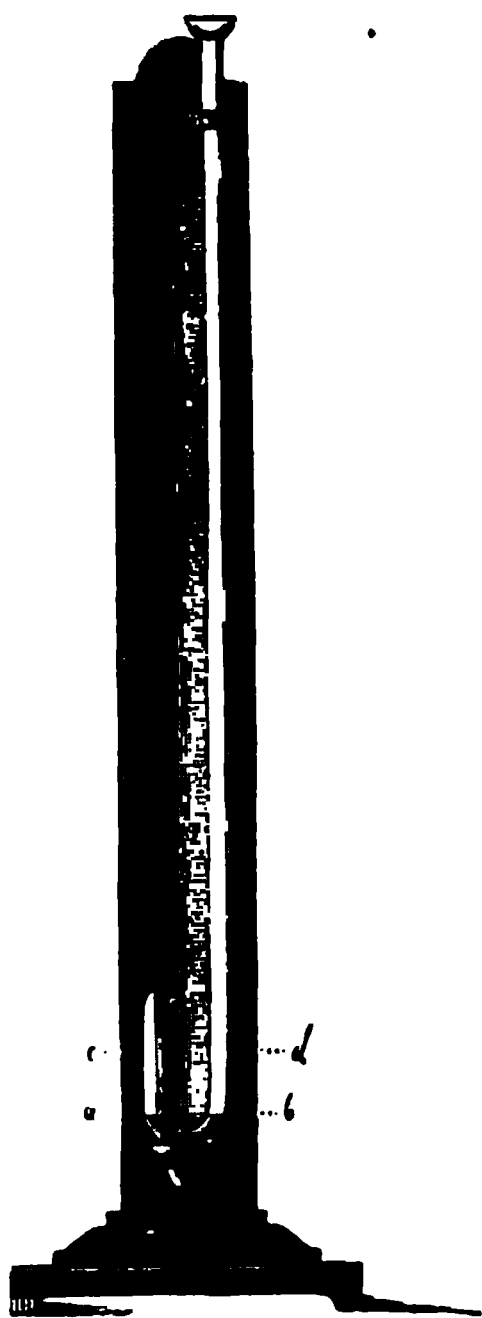


Fig. 332.

sur ses deux surfaces libres vient alors à verser du mercure dans la grande branche, l'équilibre est rompu; le mercure monte dans la petite branche en comprimant l'air qu'elle contient; mais il monte beaucoup plus haut que dans la grande. Il s'établit ainsi un nouveau équilibre; et comme le mercure doit être en équilibre sur le plan horizontal *cd* qui est à la plus basse de ses deux surfaces libres, il en résulte que la pression exercée par l'air qui est renfermé dans la petite branche est égale à la pression de l'air extérieur qui s'exerce librement sur le mercure de la grande branche, augmentée de la pression due à la colonne de mercure qui existe dans cette branche au-dessus du plan horizontal *cd*. En comparant le nouveau volume occupé par l'air avec le volume qu'elle occupait sous la pression atmosphérique, on voit que ces deux volumes sont inversement proportionnels aux pressions correspondantes. Ainsi, lorsque le mercure s'est élevé de moitié à réduire ce volume à la moitié, ce qu'on reconnaît à l'inspection des divisions tracées à côté de la petite

branche, la différence de niveau du mercure dans les deux branches est égale à la hauteur de la colonne barométrique: le gaz supporte une pression double de la pression atmosphérique. Lorsque le volume de la masse d'air n'avait été réduit qu'à la moitié, la différence de niveau du mercure dans les deux branches était égale à la moitié de la hauteur de la colonne barométrique; le gaz supportait alors une pression égale à la pression atmosphérique et demie.

Des expériences nombreuses ont été faites dans le but de vérifier l'exactitude de la loi de Mariotte, pour l'air atmosphérique et divers autres gaz. Les plus récentes, et en même temps les

sont celles de M. Regnault. Ces expériences, dans lesquelles les pressions ont été poussées jusqu'à 28 atmosphères, ont fait voir que la loi de Mariotte n'est pas rigoureusement exacte ; elle est même inexacte pour des pressions qui approchent de celles pour lesquelles les gaz soumis à l'expérience passent à l'état de liquides. Les différences qui existent entre les volumes que prend successivement une même masse de gaz soumise à diverses pressions, et les volumes qu'elle devrait prendre d'après la loi de Mariotte, sont si petites, qu'on peut regarder cette loi comme exacte, sans résulter d'erreurs appréciables dans les applications à la mécanique pratique.

50. Dilatation des gaz. — Loi de Gay-Lussac. — Lorsqu'on fait varier la température d'une masse gazeuse, il se produit des effets différents, suivant les circonstances dans lesquelles le gaz se trouve placé. S'il est libre d'augmenter ou de diminuer de volume sans que la pression qu'il supporte de la part de ses parois subisse une élévation de température le dilatera ; un abaissement de température le contractera ; le changement de température déterminera un changement de volume sans changement de force élastique. Si, au contraire, le gaz est contenu dans une enveloppe fermée et inextensible de changer de grandeur, une élévation de température augmentera sa force élastique, et un abaissement la dimi-

second résultat est une conséquence du premier. On voit en effet, lorsque une masse de gaz passe d'une température à une plus élevée, sans changer de volume, on peut concevoir qu'elle a d'abord dilatée par l'effet de la chaleur, sans que sa force élastique ait varié ; puis qu'elle ait été ramenée à son volume primitif, en conservant la nouvelle température qui lui avait été donnée, ce qui entraîne une augmentation de force élastique. La loi de Mariotte indique que, dans cette partie de l'opération, la force élastique varie dans le rapport de son volume réduit au volume qu'elle avait avant d'éprouver cette contraction ; ou bien encore dans le rapport du volume primitif de la masse gazeuse, au volume qu'elle a donné l'élévation de sa température lorsque sa force élastique n'a pas varié. On peut donc en conclure que, si par l'effet d'une élévation de température, une masse gazeuse se dilate sans changer de pression, ou bien augmente de force élastique sans changer de volume, son volume s'accroît, dans le premier cas, dans le même rapport que sa force élastique dans le second ; si, dans le premier cas, le volume du gaz augmente de la moitié, du tiers, du quart, ... de ce qu'il était d'abord, dans le second cas la force

élastique augmentera de la moitié, du tiers, du quart, valeur primitive.

En étudiant la dilatation des gaz, sous pression constante, Lussac a trouvé qu'à égalité de changement de température la dilatation était la même pour tous les gaz ; qu'elle ne dépendait de leur nature. C'est en cela que consiste la *loi de Gay-Lussac*.

M. Regnault, ayant fait des expériences nombreuses et précises sur la dilatation des gaz, a reconnu que la loi de Gay-Lussac n'était pas rigoureusement exacte. Tous les gaz ne se dilatent pas de la même quantité, pour un même accroissement de température. Mais nous pouvons répéter, pour la loi de Gay-Lussac, ce que nous avons dit de la loi de Mariotte : en la regardant comme une approximation, n'en résultera aucune erreur appréciable dans les applications mécaniques pratiques.

D'après les expériences de M. Regnault, lorsque la température d'une masse d'air augmente d'un degré, sans que sa force élastique change, son volume s'accroît des $\frac{1}{273}$ de ce qu'il était à la température de 0°, ou de la glace fondante. Nous regarderons cette loi comme s'appliquant à toute espèce de gaz, en raison de ce que nous venons de dire. Si, par exemple, le gaz que l'on avait un volume de 3 000 litres à la température de 0°, se trouverait à la température de 1°, de 3 022 litres à la température de 2°, de 3 110 litres à la température de 100°. Il résulte de là que, si la température d'un gaz augmente d'un degré, sans que son volume change, sa force élastique s'accroît des $\frac{1}{273}$ de ce qu'elle était à la température de 0° : cette force élastique s'accroîtra du double, du triple, de cette quantité, si la température augmente de 2°, de 3°.

§ 251. **Influence de la pression atmosphérique sur les résultats relatifs à l'équilibre des liquides.** — Dans tout ce que nous avons dit précédemment (§§ 218 à 236), pour des liquides terminés par des surfaces libres, nous avons supposé qu'aucune pression ne s'exerçait sur ces surfaces. Les résultats auxquels nous sommes arrivés ne sont donc pas applicables aux liquides, tels qu'ils se présentent habituellement à nous, puisque les surfaces libres des liquides sont ordinairement soumises à la pression atmosphérique. Nous allons passer en revue ces divers résultats, afin de faire connaître ceux qui restent exacts, et d'indiquer les modifications qu'ils doivent être apportées aux autres, en raison des pressions atmosphériques exercées sur les surfaces libres des liquides.

1° Si un liquide pesant est en équilibre dans un vase, et si sa surface libre ne soit soumise à aucune pression, cette sur-

et horizontale (§ 218). L'atmosphère venant à presser également sur les divers points de cette surface libre, l'équilibre ne sera nullement pas troublé : donc la surface libre d'un liquide pesant en équilibre est plane et horizontale, lors même que cette surface est soumise à la pression atmosphérique.

Dans le cas où la surface libre d'un liquide pesant en équilibre est soumise à la pression atmosphérique, la pression en un point de la masse liquide, ou en un point de la paroi du vase qui le contient, n'est plus égale seulement au poids d'un cylindre du liquide, qui aurait pour base l'unité de surface et pour hauteur la distance verticale de ce point à la surface libre (§ 220) ; elle est égale à ce poids, augmenté de la pression que l'atmosphère exerce sur l'unité de surface.

• Si l'on veut déterminer la pression supportée par une surface de certaine étendue, contre laquelle un liquide pesant vient s'appuyer, ainsi que nous l'avons fait dans le § 222, on devra tenir compte de la pression atmosphérique, qui s'exerce sur la surface libre du liquide, et qui se transmet, sans changer de grandeur, à la paroi que l'on considère, pour s'ajouter à la pression qui résulte du poids du liquide. La pression totale sera ainsi augmentée, et le centre de pression n'occupera plus la même place que dans le cas où la surface libre du liquide n'éprouvait aucune pression. Mais supposons que l'on veuille déterminer la pression totale supportée par la paroi, ainsi que le centre de pression, afin de savoir quelle force il faut appliquer à cette paroi, et en quel point on doit l'appliquer, pour empêcher la paroi de céder à l'action du liquide, on devra raisonnement comme si la pression atmosphérique n'existait pas. Le résultat auquel on sera conduit sera bien celui qu'on cherche. Or si la pression atmosphérique, agissant sur la surface libre du liquide, se transmet, sans changer de grandeur, à la portion de paroi que l'on considère, d'une autre part elle agit avec la même intensité sur la face opposée de cette portion de paroi. Ces deux pressions égales et contraires se détruisent donc mutuellement, et les choses se passent de la même manière que si l'atmosphère n'exerçait aucune pression ni d'un côté ni de l'autre. Ainsi, ce que nous avons trouvé relativement à la pression supportée par une paroi régulière (§ 222), est encore exact, en tant que la recherche avait pour objet de trouver la grandeur et le point d'application de la force qui devait être appliquée à cette paroi, pour vaincre la poussée du liquide.

• Des remarques analogues doivent être faites relativement à ce que nous avons dit dans les paragraphes 223 à 226. Les pressions

de liquide ayant pour base l'unité de surface, et pour l'unité de hauteur, et que, de même, la pression en B est égale à la pression atmosphérique qui s'exerce en M, augmentée du poids du liquide qui tiendraient cinq cylindres, ayant tous pour base l'unité de surface, et dont les hauteurs seraient BD, EF, GH, IK, LM. Donc, si les pressions en A et en B soient égales, il faut que la hauteur AC soit égale à la somme des hauteurs BD, EF, GH, IK, LM, ou, en d'autres termes, que les points C et M soient situés sur un même plan horizontal.

6° Lorsque deux vases communicants contiendront deux liquides de différentes densités, et que leurs surfaces libres seront exposées à la pression atmosphérique, on trouvera encore, comme on l'a vu dans le graphique 229, que les hauteurs de ces surfaces libres, au-dessus d'un plan horizontal qui passe par leur surface de séparation, sont inversement proportionnelles aux densités des deux liquides.

7° Enfin, dans tout ce que nous avons dit relativement à la pression sur la surface libre d'un liquide soumis à des forces quelconques, nous n'avons rien dit relativement aux phénomènes capillaires, la pression atmosphérique n'apporte aucune modification aux divers résultats auxquels nous sommes parvenus. En effet, cette pression s'exerce sur chaque point de la surface libre d'un liquide, suivant une direction perpendiculaire à cette surface. Si nous composons la pression atmosphérique exercée sur une molécule de la surface libre d'un

§ 252. Vases communicants, avec pressions inégales sur surfaces libres. — Lorsqu'un liquide est en équilibre dans des vases communicants, et que ses surfaces libres ne sont soumises à aucune pression, ou bien qu'elles supportent la pression atmosphérique agissant également dans tous leurs points, ces surfaces libres sont à un même niveau (§§ 228 et 251). Mais il n'en est pas de même dans le cas où les surfaces libres du liquide, dans les vases communicants, sont en contact avec des gaz dont les forces pressantes sont différentes: les pressions exercées par ces gaz, sur les surfaces libres du liquide, étant inégales, il en résulte que ces surfaces ne peuvent plus se maintenir au même niveau. La surface la plus pressée s'abaissera au-dessous de l'autre.

Nous en avons déjà eu un exemple dans l'appareil qui nous a servi à vérifier l'exactitude de la loi de Mariotte, *fig. 332* (page 366). En ayant versé du mercure dans la grande branche, de manière d'expulser l'air contenu dans la petite branche, nous avons observé que les surfaces libres du mercure devaient se trouver à des hauteurs différentes, et que la différence de hauteur de ces surfaces correspondait à la différence des pressions supportées par elles, de l'air de l'atmosphère, et de l'air emprisonné dans la petite branche. Il suffit de répéter le raisonnement que nous avons fait alors, pour en conclure en général que la différence de niveau des surfaces libres d'un liquide, dans deux vases communicants, est égale à la hauteur d'un cylindre du liquide considéré, qui aurait pour base l'unité de surface, et dont le poids serait égal à la différence des pressions exercées sur ces deux surfaces libres, et rapportées à l'unité de surface.

Si la pression est de 400 grammes par centimètre carré sur l'une des surfaces libres du liquide, de 250 grammes par centimètre carré sur l'autre surface, et que le liquide soit de l'eau, la différence de niveau de ces deux surfaces sera de 4^m,50: parce qu'un cylindre d'eau, dont la base est d'un centimètre carré doit avoir une hauteur de 4^m,50, pour que son poids soit de 450 grammes. Si, le liquide étant toujours de l'eau, les pressions sur ses deux surfaces libres sont, d'une part de $\frac{1}{2}$ atmosphère, et d'une autre part de 2 atmosphères, la première surface se trouvera à 25^m,82 au-dessus de la seconde: car, pour que le poids d'un cylindre d'eau, ayant pour base un centimètre carré, pèse deux fois et demie (2^k,023 § 245), ou bien 2^k,582, il faut qu'il ait une hauteur de 25^m,82.

§ 253. Supposons qu'on introduise l'une des extrémités d'un tube de verre dans un vase qui contient de l'eau, puis qu'appliquant la

372 PRINCIPES RELATIFS A L'ÉQUILIBRE DES FLUIDES

bouche à l'autre extrémité du tube, on aspire l'air qui y est et on voit aussitôt l'eau monter dans le tube, et monter d'autant plus haut qu'on aura aspiré plus fortement. Ce phénomène est la conséquence du principe énoncé dans le paragraphe qui précède : quand on applique la bouche à l'extrémité du tube, de manière à ne recevoir aucune communication de l'intérieur de ce tube avec l'extérieur, l'air qui y est contenu communique librement avec celui qui est dans la bouche et dans les poumons, et forme avec lui une masse d'air isolée, contenue dans une enveloppe fermée de toutes parts. L'aspiration consiste dans une dilatation de l'espace occupé par l'air dans les poumons. Cette dilatation produisant une augmentation du volume de l'enveloppe qui renferme notre masse d'air, et cet air se dilate dans la totalité de l'espace qui lui est offert, il en résulte une diminution correspondante dans sa force élastique. La pression que l'air du tube exerce sur la surface de l'eau avec laquelle il est en contact, devient donc plus faible qu'elle n'était précédemment ; c'est-à-dire plus faible que la pression atmosphérique : et comme la dernière pression agit toujours avec la même intensité à l'extérieur du tube, il s'ensuit que la surface libre de l'eau est moins élevée dans le tube que dehors. C'est ce qui détermine une élévation de la surface liquide à l'intérieur du tube, élévation qui sera d'autant plus grande, que la différence des pressions sur les surfaces libres est plus grande, c'est-à-dire que l'aspiration sera plus forte.

L'aspiration, produite avec la bouche, ne peut jamais faire monter l'eau bien haut dans le tube. Mais si, au lieu de cela, on applique le tube, supposé très long, en communication avec une machine pneumatique, de manière à en retirer progressivement des portions de plus en plus grandes de l'air qu'il contient, on verrait l'eau monter de plus en plus. Il faut observer cependant que l'ascension produite ainsi par aspiration, ne peut pas dépasser une certaine limite. La différence des pressions sur les surfaces libres de l'eau à l'intérieur et à l'extérieur du tube, ne peut jamais surpasser la pression atmosphérique, puisque la plus grande de ces deux pressions est la pression atmosphérique elle-même. La différence de niveau de l'eau, occasionnée par cette différence des pressions, peut donc pas être plus grande que la hauteur d'une colonne capable de faire équilibre à la pression atmosphérique, telle qu'elle est au moment de l'expérience. Si, à ce moment, la colonne barométrique a une hauteur de 0^m,76, l'eau ne pourra pas monter dans le tube à plus de 10^m,33 au-dessus du niveau extérieur. Si l'expérience se faisait sur une haute montagne, où la hauteur de la colonne barométrique fût beaucoup moindre, la limite que

asser l'élévation de l'eau par aspiration serait de beaucoup à 40^m,33.

au lieu d'aspirer l'air qui est en contact avec l'une des es d'une masse d'eau contenue dans des vases communiquants la force élastique de cet air, on le comprimant ère quelconque, on déterminera une dénivellation on ire ; la surface libre soumise ainsi à une pression plus écedément s'abaissera, et l'autre s'élèvera d'une quan- ondante. Si, par exemple, une caisse fermée A, fig. 333,

l'eau qui peut passer librement au B, adapté à la caisse près de les surfaces de l'eau dans la ans le tuyau se trouveront au au, tant que les pressions sup- ces surfaces seront égales. Mais sion atmosphérique s'exerçant sur l'eau du tuyau B, on intro- la caisse A, par le tuyau C, des l'air de plus en plus grandes, yens dont nous parlerons plus rce élastique de cet air croitra nt ; la pression qu'il exercera



Fig. 333.

le la caisse deviendra de plus en plus grande, et l'eau e plus en plus dans le tuyau B. La différence de niveau ans le tuyau et dans la caisse, est ici déterminée par ce entre la pression de l'air en A et la pression at- se qui agit en B : et comme la première de ces deux eut croître indéfiniment, il en résulte que la hauteur à au pourra s'élever ainsi dans le tuyau B est également a hauteur de la surface de l'eau dans le tuyau B, au-des- urface de l'eau dans la caisse A, sera égale à autant de 3 que l'excès de la pression de l'air en A sur la pression que contiendra d'atmosphères (§ 245).

est important d'observer la différence essentielle qui existe ation de l'eau par aspiration, et l'élévation par com- ans le premier cas, l'eau ne peut pas s'élever à une hau- grande que celle d'une colonne d'eau qui serait équilibre n atmosphérique ; tandis que, dans le second cas, elle peut ne hauteur aussi grande qu'on veut.

Encrier siphonide.—Pour qu'un encrier conserve bien il contient, il est nécessaire que ce liquide ne soit en tion directe avec l'atmosphère quo par une surface de

374 PRINCIPES RELATIFS A L'EQUILIBRE DES FL

petite étendue, afin de diminuer autant que possible qui a lieu sur cette surface, et de diminuer aussi la poussière qui y tombe pour se mêler à l'encre et l'atteindre ce but, on a imaginé diverses formes d'encrions examiner les deux principaux, ceux qui sont les depuis quelques années : ce sont l'encrier siphon pompe.

L'encrier siphon, représenté par la fig. 334, est quel on donne ordinairement d'un tronc de cône ou d'une ramide, et qui est fermé de excepté vers le bas, où il ouverture garnie d'une tube qui a été introduite dans c n'en remplit pas habituelle capacité, est surmontée d quantité d'air ; elle se re dans la tubulure, où elle :



Fig. 334.

certain niveau. Le niveau de l'encre étant plus élevé de l'encrier que dans la tubulure, il en résulte que la que de l'air qui est enfermé au-dessus de l'encre doit plus petite que celle de l'air atmosphérique. A mes prend de l'encre, en introduisant la plume dans la tubulure du liquide s'y abaisse. La différence du niveau à l'extérieur devenant plus grande, l'équilibre est trou abaissement de la surface libre du liquide dans l'encrion, d'une élévation correspondante du niveau dans et d'une dilatation de l'air qui surmonte la première s blit cet équilibre : mais cette élévation du niveau dans est plus faible que l'abaissement qui avait été produit tité d'encre qu'on y avait prise. Ainsi en puisant de la tubulure, on fait baisser en même temps les deux et du liquide, et l'on détermine une dilatation de l'air int ne peut avoir lieu qu'autant que le niveau inférieur s que l'autre. La surface libre de l'encre dans la tubulur ainsi progressivement, finit bientôt par atteindre l'o laquelle cette tubulure communique avec l'intérieur de si l'on continue à prendre de l'encre, une bulle d'air le vase, traverse le liquide, et vient se mêler à l'air qui La masse d'air intérieure étant ainsi augmentée, sa fe s'accroît brusquement ; le niveau de l'encre baisse à : monte à l'extérieur, jusqu'à ce que l'équilibre se rétab

quantités d'encre étant enlevées de la tubulure, le niveau baissera, comme précédemment, jusqu'à ce qu'une nouvelle bulle d'air pénètre à l'intérieur, pour faire remonter le niveau dans la tubulure, et ainsi de suite. Tandis que la position du niveau externe de l'encre descend et monte successivement, le niveau interne s'abaisse, au contraire, constamment; il descend faiblement tant qu'on puise de l'encre dans la tubulure, mais il descend plus rapidement au moment où une bulle de l'air extérieur pénètre à l'intérieur de l'encrier.

Cette disposition satisfait parfaitement à la condition indiquée plus haut, qu'il n'y ait qu'une petite surface du liquide en communication directe avec l'atmosphère. Mais elle présente deux inconvénients. Le premier consiste en ce que le niveau de l'encre varie dans la tubulure, de telle sorte qu'à certains moments, il est plus difficile d'y puiser l'encre qu'à d'autres moments. Le second inconvénient, qui est le plus grave, consiste en ce que, si la température de l'air qui est renfermé à l'intérieur de l'encrier vient à croître, sa force élastique augmentera (§ 250), le niveau s'abaissera à l'intérieur et s'élèvera dans la tubulure, et il pourra en résulter qu'une certaine quantité d'encre soit répandue au dehors. À ce qui arrivera notamment, si l'encrier a séjourné dans un endroit où la température est basse, et qu'on le transporte dans un autre endroit où la température est plus élevée; c'est ce qui aura encore lieu si l'encrier, posé sur une table, près d'une fenêtre, vient à recevoir les rayons du soleil.

§ 256. Encrier pompe. —

L'encrier pompe, représenté par la fig. 335, se compose, comme l'encrier siphonide, d'une sorte de réservoir qui communique à un gobergeon latéral par une ouverture. Mais il y a cette différence que l'air qui surmonte l'encre dans le réservoir a toujours la même force élastique que l'air atmosphérique; le couvercle qui ferme ce réservoir à sa partie supérieure ne le ferme pas assez hermétiquement pour qu'il n'y ait pas toujours libre communication entre l'air intérieur et l'air extérieur. L'encre qui est

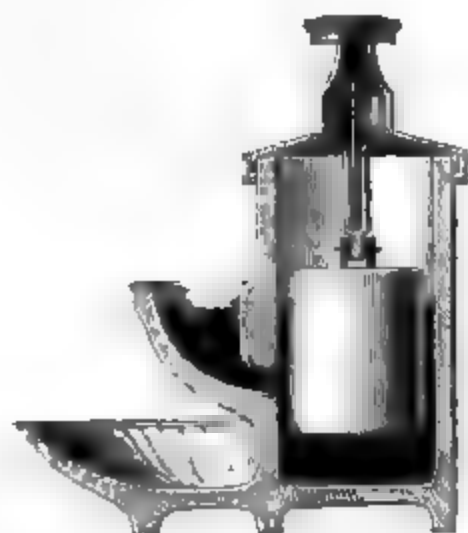


Fig. 335.

venue dans l'encrier se répand donc dans le réservoir et dans le

tout amour qu'il lui. Ce cylindre, suspendu à une tige l'intérieur est tarandé en forme d'écrou, peut s'élever et au moyen d'une vis qui pénètre dans cet écrou, et descend au-dessus du couvercle du réservoir. En faisant tourner ce bouton qui termine cette vis, on fait monter ou descendre le cylindre, il plonge alors plus ou moins dans l'encre et détermine ainsi une élévation ou un abaissement de son niveau. On se fait sentir aussi bien à l'extérieur qu'à l'intérieur.

L'encre du réservoir n'est pas ici, comme dans l'encre entièrement soustraite au contact de l'air atmosphérique, désavantage est faible: car, d'une part, le couvercle ne tombe pas de poussière; et, d'une autre part, la surface liquide dans le réservoir étant de petite étendue, peu resserrée entre les parois de ce réservoir et le contour du plongeur, l'évaporation ne doit y être que très faible. Le couvercle du réservoir, tout en ne formant pas de joint, empêche qu'il ne se produise trop facilement des courants d'air, qui renouvelleraient constamment celui qui est en contact avec le liquide, et activeraient ainsi beaucoup l'évaporation.

Cette dernière considération nous conduit à une conséquence importante. Lorsqu'on cesse de se servir de la pompe, on doit faire tourner le bouton de manière à élever le niveau de l'encre, et à la faire ainsi rentrer du godet et

Instrument nommé *tâte-vin*, fig. 336. C'est un tube de fer blanc, ses dimensions transversales, augmentant d'abord progressivement depuis le haut jusque près de l'extrémité inférieure, augmentent ensuite brusquement, de manière à ne laisser à l'extrémité inférieure qu'une très petite ouverture. Pour se servir de cet instrument, on l'introduit dans le tonneau par la bonde, en l'enfonçant assez pour qu'il pénètre dans le liquide. Ses deux extrémités étant ouvertes, l'air pénètre à son intérieur, et s'y élève jusqu'au niveau extérieur. On met alors le pouce sur l'ouverture supérieure, afin de la fermer, et d'intercepter ainsi toute communication de l'air qui s'y trouve encore avec l'atmosphère : puis on retire l'instrument. A mesure que le vin sort du liquide que contient le tonneau, le niveau du vin baisse à son intérieur, et par suite l'air qui le surmonte se dilate, la pression exercée par cet air devenant



FIG. 336.

faible que la pression atmosphérique, le niveau du vin à l'intérieur de l'instrument ne s'abaisse pas jusqu'au niveau extérieur : le vin y est soutenu à un niveau plus élevé, par l'excès de la pression atmosphérique sur la pression de l'air intérieur. Ainsi, tant que l'instrument plonge dans le vin du tonneau, la surface du liquide qui est à l'intérieur s'éloigne de plus en plus du haut du tube, à mesure qu'on élève l'instrument, puisque l'air qui le surmonte se dilate : mais cette surface s'élève en même temps de plus en plus au-dessus de la surface du vin du tonneau. Enfin, au moment où l'orifice inférieur est sur le point de sortir du liquide, une certaine quantité de vin est contenue dans le tube. Si l'on soulève davantage l'instrument, il conservera cette quantité de vin à son intérieur, sans qu'il en sorte une goutte. Cela tient à ce que la pression atmosphérique, s'exerçant librement par l'ouverture inférieure du tube, fait équilibre au poids de la colonne de vin qu'il renferme, à la pression qui provient de l'air dilaté situé au-dessus de ce vin. Le liquide est soutenu par la pression atmosphérique, comme était l'eau contenue dans le verre renversé du paragraphe 243 (fig. 323, p. 355). La feuille de papier qui recouvrait l'ouverture du verre, dans cette expérience, n'est plus nécessaire ici, à cause de la petitesse de l'orifice inférieur du tube : cet orifice ne permettrait pas à l'air de passer dans une portion de son étendue, pendant que le vin coulerait dans la portion restante.

Quand on a retiré le *tâte-vin* du tonneau, il suffit de le porter au-dessus d'un vase, et de retirer le pouce qui fermait l'orifice supé-

378 PRINCIPES RELATIFS A L'ÉQUILIBRE DES FLUIDES

rieur, pour que tout le vin qu'il contient coule dans la communication établie ainsi entre l'air de l'intérieur de l'im et l'air extérieur détermine une compression de cet air qui reprend ainsi une force élastique égale à celle de l'air atmosphérique : et le vin, qui n'est plus soutenu par la différence de pressions qu'il supporte en haut et en bas, s'écoule complètement.

§ 258. **Moyen d'obtenir un niveau constant pour un liquide contenu dans un vase.** — Supposons qu'on veuille entretenir une hauteur constante le niveau d'un liquide contenu dans un vase dont le niveau tend à baisser, soit par suite d'un écoulement du liquide par un orifice inférieur, soit par suite de l'évaporation qui se fait à sa surface, on pourra employer le moyen suivant, qui se sert notamment dans les opérations chimiques, lorsqu'on veut entretenir une assez grande quantité de liquide. Au-dessus du vase dans lequel on veut entretenir un niveau constant, fig. 337 (ici

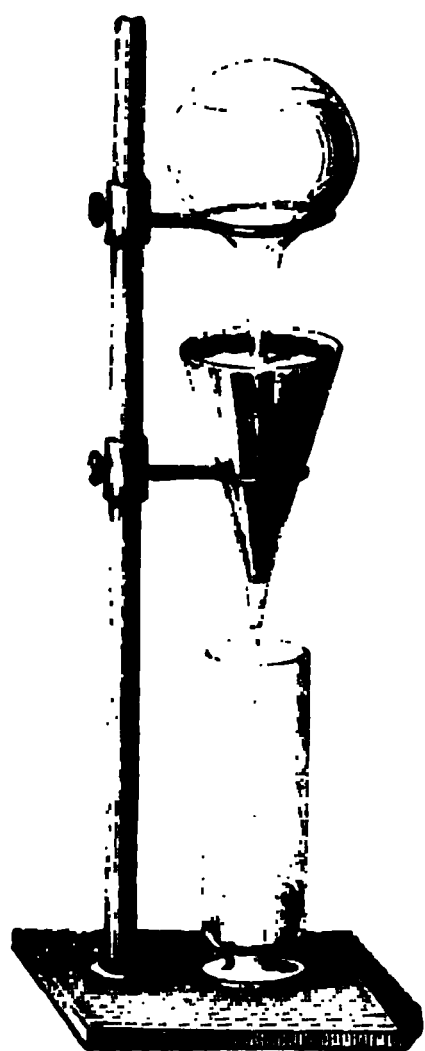


Fig. 337.

est un entonnoir qui contient un papier), on dispose un autre vase au-dessus du premier, à étroite ouverture : ce second vase est d'avance rempli du liquide qui doit être maintenu à un certain niveau dans le premier vase. On place celui qui en sera sorti. L'orifice du second vase est placé précisément à la hauteur à laquelle on veut entretenir le niveau du liquide dans le premier. Le liquide qui est dans le second vase ne communiquant pas librement avec l'atmosphère par sa partie supérieure, ne peut pas s'écouler, tant que l'orifice du second vase plonge d'une petite quantité dans le liquide du premier vase. Ce liquide est maintenu à ce niveau par la pression atmosphérique, qui agit sur la surface du liquide du second vase, et qui met par l'orifice inférieur du second vase une pression qui n'est pas entièrement vaincue par la pression provenant de l'air dont le liquide du premier vase est surmonté, en raison de la dilatation de cet air, suite de la diminution de force élastique que cet air a éprouvée tout d'abord. Les choses se passent ici exactement de la même manière que dans l'encrier (§ 255).

Lorsque le niveau du liquide baisse dans le vase inférieur et découvre ainsi l'orifice du vase supérieur, une bulle d'air monte par cet orifice, monte dans le haut du vase, et une portion de liquide passe du vase supérieur dans le vase inférieur.

le liquide se trouve ainsi relevé dans le vase inférieur. se encore, il va livrer passage à une nouvelle bulle d'air, sera dans le vase supérieur, pour en faire sortir une nouvelle portion de liquide, et ainsi de suite. Le niveau est ainsi en une hauteur constante dans le vase inférieur, tant qu'il ne contient encore une portion du liquide qui y avait été tout d'abord.

Tubes de sûreté. — Le jeu des tubes de sûreté, que l'on joint aux appareils, dans les opérations chimiques, peut être compris, à l'aide des principes qui précèdent. Ces tubes sont employés pour éviter les accidents qui pourraient résulter de ce que la force élastique du gaz contenu dans l'appareil est différente de celle de l'air atmosphérique. Si cette force devenait trop considérable, elle pourrait donner lieu à une explosion ; si elle était trop faible, il en résulterait une sorte d'aspiration qui ferait monter à l'intérieur de l'appareil les liquides avec lesquels il est en communication, ce qui pourrait encore donner lieu à de graves accidents. Pour se mettre à l'abri de ces accidents, on place, sur une des parties de l'appareil, un tube double-courbé, *fig. 338*, dont la branche du milieu présente une courbure en S, et dont l'extrémité supérieure s'évase pour servir de bouchon ; et l'on introduit dans ce tube une petite quantité d'un liquide, soit de l'eau, soit du mercure.

Ce liquide intercepte la communication qui existait entre l'appareil et l'atmosphère dans toute la longueur du tube recourbé : le gaz qui est contenu dans l'appareil, pénétrant par la branche inférieure du tube, jusque dans le réservoir *b*, ne peut pas passer dans l'atmosphère, en s'échappant par la branche supérieure du tube. Si la force élastique du gaz intérieur est précisément égale à celle de l'air atmosphérique, les surfaces libres du liquide se trouveraient à un même niveau, dans le réservoir *b* et dans la branche inférieure du tube.

Mais si il y a excès de l'une de ces deux forces sur l'autre, elle fera baisser la surface libre du liquide sur laquelle elle agit, l'autre surface monterait au même temps : et la différence de niveau de ces deux surfaces sera d'autant plus grande qu'il y aura plus de différence entre les forces élastiques à l'intérieur et à l'extérieur. Dans le cas où le gaz intérieur acquies une trop forte tension, le liquide serait chassé de la boucle et projeté au dehors par le tube *c* ; alors la communication serait établie dans toute la longueur du tube de sûreté, le gaz



Fig. 338.

intérieur pourrait se répandre dans l'atmosphère, en le a et sa force élastique diminuerait promptement. Dans le contraire, où la diminution de tension à l'intérieur de a pourrait donner lieu à une *absorption*, tout le liquide dans la boule b , et des bulles d'air, traversant ce liquide avec difficulté, à cause de la largeur de l'espace qu'il occuperaient les unes après les autres pénétrer dans l'appareil a , ce qui élèverait assez promptement la force élastique du gaz y est contenu, pour qu'il ne se produisît rien de fâcheux.

§ 260. *Manomètres*. — Pour mesurer la force élastique du gaz contenu dans une enveloppe fermée, on emploie des tubes auxquels on donne le nom de *manomètres*. On divise ces tubes en deux espèces bien distinctes : les *manomètres à air libre* et les *manomètres à air comprimé*.

Un manomètre à air libre est un tube doublement recouvert, entièrement analogue au tube de sûreté dont nous venons de parler, il n'y a de différence que dans la longueur de la branche c qui est généralement beaucoup plus grande dans un manomètre que dans un tube de sûreté. L'excès de la force élastique du gaz sur celle de l'air atmosphérique détermine une ascension du mercure (qui est ici du mercure) dans la branche c ; et le rapport entre la différence de niveau de ces deux surfaces libres et la hauteur de la colonne barométrique fait connaître le nombre d'atmosphères dont se compose l'excès de force élastique que l'on veut mesurer. D'après cela, si la différence de niveau du mercure dans le manomètre est de 0^m,76, la pression exercée par le gaz est de 2 atmosphères; si cette différence de niveau est de 2 fois 0^m,76, la pression du gaz est de 3 atmosphères, et ainsi de suite. Une échelle graduée est disposée à côté de la branche dans laquelle le mercure du gaz fait monter le mercure; et la graduation est faite de manière à indiquer immédiatement la valeur de cette pression en atmosphères et dixièmes d'atmosphère, d'après la position de la surface libre du mercure le long de l'échelle.

§ 261. La disposition du manomètre à air comprimé est toute différente de celle du manomètre à air libre; mais la branche c , dans laquelle la pression du gaz fait monter le mercure, est fermée à sa partie supérieure, au lieu d'être ouverte comme dans le manomètre à air libre. La présence d'une certaine quantité d'air emprisonnée dans cette branche fermée c , fait que le mercure ne peut pas y monter d'une aussi grande hauteur, pour une même pression du gaz dans la branche ab ; car, à mesure que le mercure monte en c , l'air dont il est surmonté se comprime, et sa

avec la différence de niveau du mercure dans les tubes *a* et *b* à faire équilibre à la pression que le gaz exerce dans le tube *a*. L'air contenu en *c* est réduit à moitié du volume qu'il occupait sous la pression atmosphérique, sa force élastique sera double de la pression atmosphérique; la pression exercée en *b* sera donc égale à la pression atmosphérique plus la fraction d'atmosphère que la différence de niveau du mercure en *b* et *a* représente. Le tube *c* est gradué d'avance, de manière à indiquer immédiatement la force élastique du gaz après la position que cette force élastique prendra à l'extrémité de la colonne de mercure.



Fig. 339.

Le manomètre à air comprimé indique toujours exactement la force élastique du gaz avec lequel il est mis en communication. La température de l'air emprisonné dans le tube est toujours la même que celle qu'il avait lorsqu'on le remplit. Nous avons vu, en effet (§ 250), que les changements de température influent d'une manière très notable sur la force élastique d'une masse de gaz qui conserve un même volume. Le manomètre à air comprimé fonctionne à des températures différentes de celle à laquelle il a été gradué, il peut fournir une mesure exacte de la force élastique qu'il est destiné à mesurer.

Compressibilité des liquides. — Lorsque l'on soumet une certaine quantité d'un liquide contenu dans une bouteille fermée, le liquide éprouve une diminution de volume tellement petite, que l'on a douté pendant longtemps de sa réalité, et c'est de là que les liquides ont reçu le nom d'*incompressibles*. Dans les expériences qui ont été faites pour connaître si les liquides étaient compressibles, le piston exerçait une pression sur une portion de la surface supérieure marchait bien d'une certaine quantité dans le sens qui lui était appliquée, il pénétrait bien un peu dans l'enveloppe fermée qui contenait le liquide; mais cette pénétration du volume du liquide pouvait être uniquement due à la tension des parois de l'enveloppe, produite par la pression qu'elles éprouvaient de la part du liquide. On ne put arriver à un résultat concluant qu'en s'opposant à cette tension des parois, à l'aide d'une pression appliquée sur elles, et capable de faire équilibre à la pression intérieure. C'est ainsi que Ørsted fut conduit à employer l'appareil *mésomètre*.

Un réservoir de verre *a*, fig. 340, est fermé de toutes parts à sa partie supérieure, où il est muni d'un tube *b* de



FIG. 340.

diamètre. On remplit d'eau le réservoir, en ayant soin d'introduire, au temps, dans ce tube, une petite quantité de mercure destiné à servir d'index. L'index est ensuite placé à l'intérieur d'un vase de verre, que l'on remplit également d'eau. Un piston *B* ferme exactement le vase: sa tige, garnie d'un filet de vis, traverse le couvercle *C* qui fait fonction de bouchon; elle se termine par une poignée à l'aide de laquelle on peut la faire tourner dans son axe. Lorsqu'on vient à agir sur cette poignée, on fait descendre le piston dans le vase *A*. L'eau qu'il contient éprouve une pression de la part de ce piston; cette pression se transmet au réservoir *a*, et au tube *b* qui le contient, et l'on voit l'index de mercure s'abaisser dans le tube *b*. Si la pression intérieure du réservoir *a* et de la partie inférieure du tube qui est au-dessous de l'index de mercure, pouvait augmenter par suite d'une pression qui est exercée, l'abaissement de cet index ne prouverait pas que l'eau contenue dans le réservoir *a* a diminué de volume. Mais il n'en est pas ainsi. Le réservoir *a* et le tube *b* sont soumis de toutes parts à la même pression qui est déterminée par l'enfoncement du piston *B*: le verre dont ils sont formés est comprimé dans tous les sens de la même manière. Si l'on considère une petite portion de

cette enveloppe de verre, on verra que ses dimensions doivent rester les mêmes, tant dans sa hauteur et sa largeur, que dans son épaisseur; en un mot, le réservoir *a* et le tube *b*, diminuant de diamètre dans tous les sens, doivent prendre une forme semblable à celle qu'ils avaient d'abord: le mot semblable étant employé dans l'acception qu'on lui donne en géométrie. La pression exercée par le piston *B* donne donc lieu à une diminution de la capacité intérieure du réservoir *a* et du tube *b*, tout aussi bien qu'à une diminution de l'espace occupé par le verre dont ils sont formés. Or, cela, si l'index de mercure restait stationnaire dans le

tant où l'on exerce la pression, cela indiquerait déjà que l'eau du réservoir *a* a diminué de volume; l'abaissement de l'index indique, à plus forte raison, une diminution réelle dans le volume de l'eau.

Un tube de verre *m*, fermé par le haut, et gradué en parties d'égal volume, est placé à côté du réservoir *a*. Ce tube était plein d'air et l'eau du vase *A* n'était soumise qu'à la pression atmosphérique. La pression, produite par l'abaissement du piston *B*, détermine une diminution de volume de cet air; l'eau monte dans le tube; la position qu'y occupe son niveau dépend de la grandeur de la pression, et peut servir à la mesurer. Ce tube *m*, ouvert par le haut, et primitivement rempli d'air, constitue un véritable manomètre à air comprimé.

Des expériences précises, faites par M. Regnault, avec un appareil peu différent de celui dont nous venons de parler, l'ont conduits aux résultats suivants. Le volume d'une masse d'eau diminue de 0,00048 pour chaque atmosphère dont s'accroît la pression que porte cette eau; c'est-à-dire que, si une masse d'eau, dont le volume est d'un million de litres, lorsque l'eau n'a aucune pression à porter, venait à être soumise à une pression de 1 atmosphère, de 3 atmosphères,..... son volume diminuerait de 48 litres, de 2 fois 48 litres, de 3 fois 48 litres,..... Le volume d'une masse de mercure diminue de même de 0,000035, pour chaque atmosphère dont augmente sa pression.

263. Équilibre des fluides dont les diverses parties ne sont pas à la même température. — Nous avons trouvé qu'un fluide, ou un gaz, soumis à la seule action de la pesanteur, ne saurait être en équilibre qu'autant que la pression était la même en tous les points situés sur un même plan horizontal (§§ 212 et 213); cette condition ne peut être remplie qu'autant que la température est aussi la même pour tous les points. Supposons, en effet,

le fluide que nous considérons soit divisé en couches minces par un grand nombre de plans horizontaux menés à travers de petites disques les uns au-dessus des autres, et voyons ce qui arriverait si la température n'était pas la même dans toute l'étendue d'une de ces couches. Nous savons que, sous une même pression, la densité d'un fluide (liquide ou gaz, peu importe) est, sauf quelques exceptions, d'autant plus faible que sa température est plus élevée. La densité du fluide varierait donc dans l'étendue de notre couche; et la pression étant la même pour tous les points de sa face supérieure, elle ne serait plus la même pour tous les points du plan horizontal qui la termine inférieurement : puisque la différence des pressions en

384 PRINCIPES RELATIFS A L'EQUILIBRE DES FLUIDES

deux points d'une même verticale, pris sur les deux faces d'une couche, est égale au poids de la colonne de fluide comprise entre ces deux points, et que ce poids ne serait pas le même si on prenait deux points dans des couches différentes. L'inégalité de température entre deux points d'une même couche horizontale ne peut donc pas exister avec l'équilibre du fluide, puisqu'il en résulterait nécessairement des inégalités de pression, pour des points situés à une même profondeur. Donc un fluide pesant, dont les diverses parties ne sont pas à la même température, ne peut être en équilibre qu'autant qu'il est disposé par couches horizontales, dans chacune desquelles la température est la même partout. Ces couches superposées seraient si elles étaient formées d'autant de liquides de différentes densités, qui ne peuvent être en équilibre les uns au-dessus des autres que leurs surfaces de séparation soient planes et horizontales. La stabilité de l'équilibre exigeant d'ailleurs que la densité ne varie pas en passant d'une couche à une autre couche plus voisine, il suit que généralement la température croîtra à mesure qu'on va plus bas dans le fluide.

Ce dernier résultat est sujet à quelques exceptions. On sait, par exemple, que la densité de l'eau, qui décroît généralement avec la température s'élève, s'accroît au contraire lorsque la température passe de 0° à $4^{\circ}, 1$: cette anomalie en entraîne une autre dans la distribution des températures, dans les parties d'une masse d'eau en équilibre, lorsque parmi ces parties il s'en trouve qui sont comprises entre 0° et $4^{\circ}, 1$. Une masse de gaz, d'une température uniforme, est en équilibre, si les couches supérieures sont moins denses que les couches inférieures (§ 240) ; on conçoit qu'on puisse refroidir les couches supérieures d'une quantité assez petite, pour que leurs densités, tout en augmentant par cet abaissement de température, restent plus faibles que celles des couches inférieures : l'équilibre sera encore, et restera stable, quoique la température ne soit plus la même partout. Le dernier cas qui se présente dans l'atmosphère de la terre : c'est que les couches horizontales, dans lesquelles on peut dire qu'il y a une colonne d'air s'élevant dans toute la hauteur de l'atmosphère, vont constamment en diminuant de bas en haut, et que la température s'abaisse aussi constamment.

§ 264. Lorsqu'un liquide est en équilibre dans un vase, et qu'on chauffe extérieurement une portion de la paroi latérale ou du fond du vase, la chaleur se transmet au liquide à travers cette paroi, et l'équilibre est troublé. Le liquide échauffé monte : il es-

LA TEMP. VARIE D'UN POINT A UN AUTRE. 385

portion de liquide qui s'échauffe à son tour, et ainsi sorte qu'il en résulte un mouvement continu de circulation successive des diverses portions du liquide contre la paroi chauffée, et détermine une élévation proportionnelle de toute la masse liquide. Si le liquide ne se meut pas seulement par le haut, le mouvement de circulation ne se produirait pas, et la chaleur ne se répandrait avec une grande lenteur dans toute la masse liquide. C'est ainsi produit dans une masse d'eau, par l'échauffement d'une partie de la paroi du vase qui la renferme, peut être au moyen d'un peu de sciure de bois qu'on introduit dans le vase, et dont les diverses parcelles participent au mouvement communiqué par la chaleur.

Phénomènes analogues se produisent dans une masse de gaz lorsqu'on vient à chauffer une portion de la paroi dans laquelle le gaz est renfermé, ou bien un corps avec lequel il est en contact. On fait du feu dans un poêle dont le tuyau s'élève au-dessus du contenu dans une chambre, ce tuyau s'échauffe, et l'air qu'il contient, s'échauffant également, se met en mouvement ascendant. Un courant ascendant existe ainsi continuellement dans le tuyau, tant qu'il reste plus chaud que l'air environnant. On rend visible ce courant, lorsque la lumière du soleil vient frapper le tuyau, et projeter son ombre sur un mur voisin ; on voit alors, à l'extrémité de l'ombre du tuyau, des ombres légères qui volent avec rapidité, et qui sont produites par les tourbillons d'air en mouvement, et les changements de densité de cet air causés par le mouvement lui-même.

On peut aussi rendre le courant ascendant visible, en adaptant au tuyau un tourbillon de bas en haut, *fig. 344*. On attache à sa pointe une bande de papier qui se roule tout autour de lui en forme de spirale, en venant frapper la face intérieure de cette bande de papier, qui se roule tout obliquement sur son passage, et communique un mouvement de rotation à la verticale qui passe par son point d'appui.

Les mouvements de l'air atmosphérique, c'est-à-dire les vents, sont produits par ce que certaines parties de l'atmosphère changent de densité, sans servir une même force élastique, en sorte que

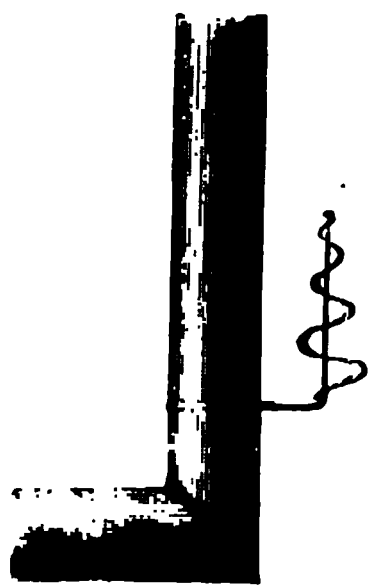


Fig. 341.

l'équilibre ne pouvant plus subsister, l'air se met à prendre une disposition différente dans laquelle veau en équilibre. Si la cause qui a troublé l'équilibre agit, le mouvement de l'air continuera également. Les de densité qui déterminent ces mouvements sont pro des changements de température, soit par la présence plus ou moins grande de vapeur d'eau qui vient l'air.

§ 265. *Aérage des mines.* — Il arrive souvent rempli d'air communiqué de plusieurs manières à l'atmosphère : c'est ainsi que l'air contenu dans une communication avec l'air atmosphérique, soit par les portes et fenêtres, soit par la cheminée. Dans de pareilles circonstances, les différences de température en divers points entraînent encore des mouvements de l'air, ainsi que nous allons voir.

Considérons d'abord ce qui arrive, quand une cavité

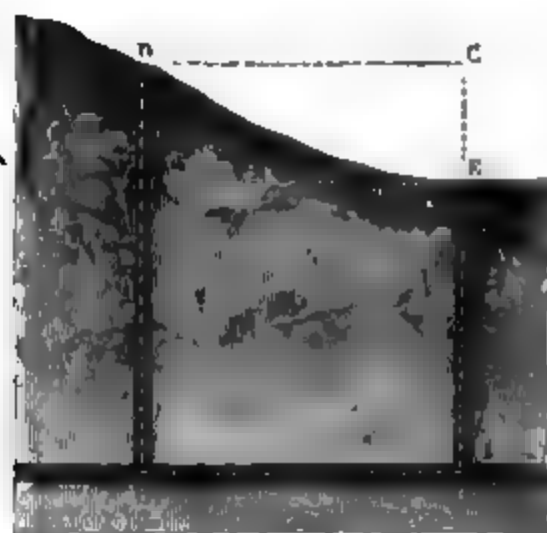


Fig. 342.

une mine, qui communique avec l'atmosphère par deux bouches, fig. 342. Si une livre de l'air, à l'intérieur de la mine, est en équilibre avec l'air extérieur, il faut que la même pression soit la même aux deux points situés sur un plan horizontal à l'intérieur d'une mine. On conçoit de l'espace par le gaz. La pression en A et B doit être égale entre elles. Les pressions en A et en C sont égales, car la différence de pression en A et en C est é

de la colonne d'air AC ; la différence des pressions en A et en B est égale au poids de la colonne d'air BD : donc il faut que les deux colonnes d'air AC, BD, soient les mêmes. Cela sera rempli, si la température est la même dans toute la masse d'air. Elle le sera encore, si la température est la même le long des deux colonnes d'air AC, BD, encore si les changements de densité résultant des

qui existent le long de ces colonnes d'air se compensent et d'autre. Mais il arrivera très rarement que les choses se passent ainsi : habituellement les poids des colonnes d'air AC, BD, ne sont pas égaux, et l'équilibre ne pouvant avoir lieu, il en résulte un mouvement, en vertu duquel l'air descendra par un des puits, et remontera par l'autre.

Supposons que les orifices des deux puits ne soient pas au même niveau comme l'indique la fig. 342. Cette seule circonstance donnera lieu à un courant d'air continu à l'intérieur de la mine, courant qui sera dirigé dans un sens en été, et en sens contraire en hiver. On sait, en effet, que la température de l'intérieur de la mine, à une petite profondeur au-dessous du sol, reste constante toute l'année, et que cette température est inférieure à celle de l'air en été, supérieure au contraire à celle de l'air en

hiver. Les portions AE, BF de nos deux colonnes d'air, qui sont situées au-dessous du plan horizontal mené par le plus bas des orifices des deux puits, peuvent être regardées comme ayant la même température, puisqu'elles sont en contact avec des parois dont la température est la même. Mais il n'en est plus ainsi des portions supérieures CE, DF : la première est à l'extérieur de la terre, et la seconde est à l'intérieur. En été, la colonne d'air CE sera plus chaude que la colonne DF, et par conséquent moins pesante qu'elle ; l'inégalité de poids des colonnes totales AC, BD, donnera lieu à un mouvement ascendant dans le puits de droite, et descendant dans le puits de gauche. L'air chaud, venant de l'extérieur, et pénétrant dans le puits de gauche, s'y refroidira, et le mouvement continuera à se faire de la même manière. En hiver, la colonne d'air CE sera plus froide que la colonne DF ; il en résultera encore une inégalité de poids pour les deux colonnes AC, BD. Mais cette inégalité ne se produira plus dans le même sens qu'en été, et elle donnera lieu à un mouvement de sens contraire, qui se continuera également, tant que la température de l'air sera moins élevée en dehors des puits qu'à l'intérieur.

Il est indispensable qu'il se produise, à l'intérieur des mines, des courants tels que ceux dont nous venons de parler, afin de renouveler l'air dans les lieux où se trouvent les ouvriers. Lorsqu'une mine ne se trouve pas dans des conditions convenables pour que le renouvellement se fasse naturellement, comme nous venons de l'indiquer, on a recours à des moyens artificiels. Un de ceux qu'on emploie le plus fréquemment, consiste à établir un petit foyer dans le voisinage de l'un des deux puits qui communiquent l'un à l'autre par

l'intérieur de la mine ; les gaz chauds qui se dégagent de ce

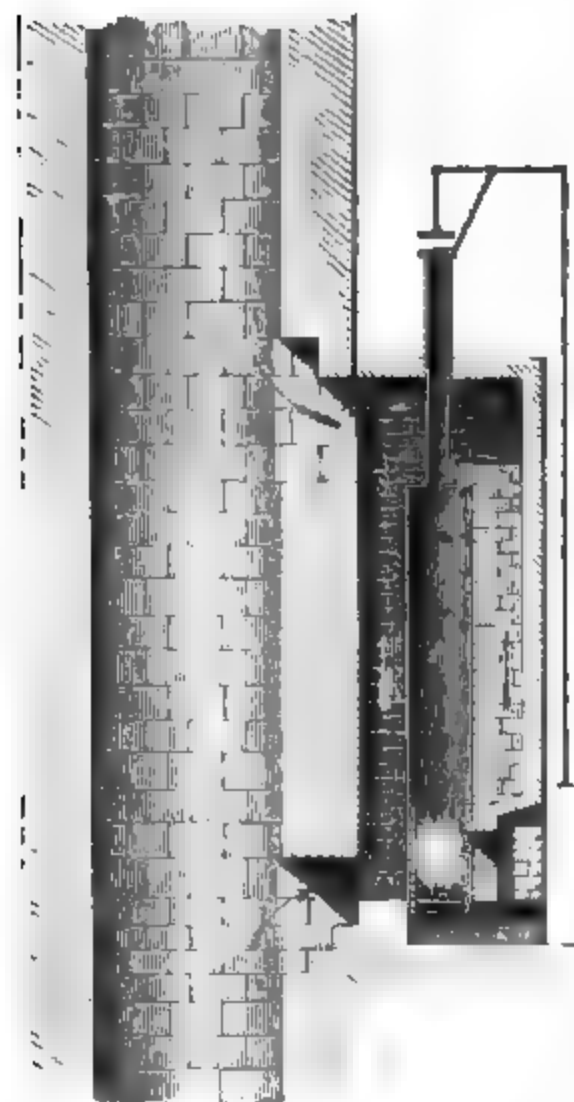


Fig. 313.

rendent dans le puits la différence de température des colonnes d'air tend à déterminer un courant d'air dans les mines de houille, souvent dangereux d'employer ainsi des forages ; parce que l'air qui vient de la mine, une partie passe par le foyer, peut contenir une assez grande quantité d'hydrogène carboné qui se produit une explosion qui s'étendrait dans la mine. Dans ce cas, pour surmonter l'orifice du puits d'une cheminée, et établir, au-dessus de cette cheminée, un réflecteur A, fig. 313, la surface extérieure en contact avec l'air vient de la mine.

Souvent la cavité d'une mine qu'on veut communiquer avec l'atmosphère que par un seul puits. Dans ce cas on divise le puits en deux compartiments par une cloison mobile, ou bien on

installe dans le puits un large tuyau, afin de faire communiquer l'air avec l'atmosphère par deux voies différentes. On s'arrange de manière à produire une différence de température dans les compartiments du puits, et les choses se passent de la même manière que s'il y avait deux puits distincts.

§ 266 **Tirage des cheminées.** — Le tirage d'une cheminée est dû à la différence des densités de l'air qui est à son intérieur et de l'air extérieur qui est situé au même niveau. L'air de

chambre où existe cette cheminée ne peut être en équilibre tant qu'il éprouve une pression égale sur tous les points d'un plan horizontal, soit que cette pression lui soit transmise par le haut de la cheminée, soit qu'elle le soit par les fentes des portes et des fenêtres. Si l'air extérieur est en équilibre, les pressions sont les mêmes pour tous les points d'un même plan horizontal qui se trouve au-dessus de la cheminée; pour que les pressions exercées sur un plan horizontal mené à l'intérieur de la chambre soient toutes égales entre elles, il faut donc que l'on trouve le même poids pour une colonne d'air comprise entre ce plan horizontal et le précédent, qu'on la prenne à l'intérieur de la cheminée, soit qu'on la prenne à l'extérieur. Mais cela ne peut pas arriver lorsque l'on fait du feu dans la cheminée: la chaleur dilate l'air qui y est contenu, et la colonne d'air qui lui correspond est moins pesante qu'une colonne de même hauteur prise à l'extérieur. Il en résulte qu'il ne peut y avoir équilibre, et tant que la différence de température, et par suite la différence de densité subsiste, il y a un mouvement continu en vertu duquel l'air de la chambre monte dans la cheminée, tandis que l'air extérieur rentre dans la chambre par les joints des portes et des fenêtres. Si la chambre était hermétiquement fermée de toutes parts, de manière que l'air extérieur ne puisse pas y entrer, la cheminée fumerait nécessairement: puisque le courant d'air dont nous venons de parler, courant qui entraîne la fumée avec lui, ne pourrait nullement s'établir.

Lorsque l'on fait du feu dans deux chambres qui communiquent entre elles avec l'autre, il arrive souvent que l'une des deux cheminées fume. Cela tient à ce que, les communications avec l'extérieur, par les joints des portes et des fenêtres, présentant quelques difficultés au mouvement de l'air, la masse d'air qui est contenue dans les deux chambres, et qui va librement de l'une à l'autre, se trouve dans des conditions analogues à celles de l'air d'une mine. Les deux cheminées, par lesquelles cette masse d'air communique avec l'atmosphère, jouent le même rôle que les deux puits qui relient l'intérieur de la mine avec la surface du sol; et pour peu que les colonnes d'air contenues dans ces deux cheminées n'aient pas le même poids, il s'établit un courant ascendant d'une part, et descendant de l'autre. Ce n'est qu'en faisant un grand feu dans les deux cheminées qu'on pourra les empêcher de fumer l'une et l'autre; parce qu'en déterminant ainsi un appel assez considérable dans chacune d'elles, on fera passer, par les faibles ouvertures qui communiquent avec le dehors, une quantité d'air suffisante pour alimenter les deux cheminées.

On comprend, par ce qui précède, que plus une cheminée est élevée, plus le tirage devra être fort. Cependant, au delà d'une certaine limite, une plus grande élévation de la cheminée n'a pas une augmentation de tirage. On conçoit en effet que la force ascensionnelle de la colonne d'air contenue à l'intérieur de la cheminée s'accroît avec la hauteur de cette cheminée, mais que cet air éprouve dans son mouvement s'accroît aussi la résistance qu'il éprouve et il peut arriver que ce que l'on gagne d'un côté, on le perd de l'autre. C'est ce qui arrive en effet : aussi n'y a-t-il pas de limite sous le rapport du tirage, à donner une hauteur déterminée à une cheminée.

Lorsqu'on a été quelque temps sans faire du feu dans une cheminée, et que l'air atmosphérique, après avoir été froid pendant plusieurs jours, acquiert une température plus élevée, on aperçoit à l'odeur de suie qui se répand dans la chambre, que l'air qui est à l'intérieur de la cheminée est plus chaud que l'air extérieur situé au même niveau, et ayant, par conséquent, une plus grande densité, la colonne d'air intérieure est plus pesante que la colonne d'air extérieure, pour une même hauteur : et cela détermine un courant en sens contraire de celui qui existe quand on fait du feu dans la cheminée. Dans ce cas l'air de la chambre est remplacé par celui qui descend de la cheminée.

§ 267. **Principe d'Archimède.** — Un liquide pesant, et

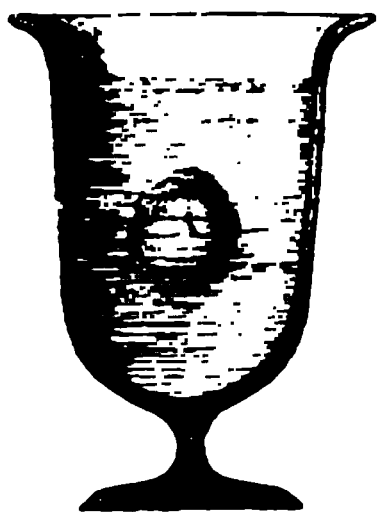


Fig. 344.

libre, exerce des pressions sur tous les corps avec lesquels il est en contact. Si l'on plonge à son intérieur un corps solide A, fig. 344, ce corps solide sera pressé par le liquide dans toutes les parties de sa surface ; toutes ces pressions auxquelles il sera ainsi soumis formeront une résultante, dont nous allons reconnaître à la fois l'existence et la grandeur par le raisonnement suivant.

Supposons d'abord que nous ayons dans un vase une masse liquide en équilibre, dans laquelle aucun corps n'est plongé. Nous considérons à son intérieur une portion de liquide dont l'ensemble présente exactement la même forme que le vase. Cette portion de liquide reste immobile, quoiqu'elle soit pesante, elle ne tombe pas, en cédant à l'action de la pesanteur, parce qu'elle est soutenue par le liquide environnant. Imaginons que cette por-

de soit solidifiée, sans changement de densité, c'est-à-dire que ses molécules ne soient plus susceptibles de changer de position les par rapport aux autres, tout en restant aux mêmes distances les que précédemment : il est clair que, par là, nous n'aurons pas blé l'équilibre. Nous aurons donc ainsi un corps solide, ayant tement la même forme que le corps A, et qui sera soutenu au du liquide qui l'environne, par les pressions que ce liquide ce aux divers points de sa surface. Ces diverses pressions, fai- équilibre au poids du corps solide dont nous parlons, doivent r une résultante égale et directement opposée à ce poids : c'est- re que cette résultante est verticale, qu'elle agit de bas en haut, ne sa direction passe par le centre de gravité du corps. Con- ns maintenant que ce corps soit anéanti, et que le corps A lui substitué, sans que le liquide ait été dérangé, il est bien évident les pressions exercées par le liquide, sur toute la surface de ce s A, seront les mêmes que celles qui agissaient précédemment le corps dont il tient la place. On doit en conclure que les pres- s exercées par un liquide sur la surface d'un corps A, qui plonge en intérieur, ont une résultante verticale, agissant de bas en t, et égale au poids du liquide qui occuperait la place du corps et que, de plus, cette résultante passe par le centre de gravité liquide déplacé. Ce principe, d'une très grande importance, a découvert par Archimède, et porte son nom.

La résultante des pressions supportées par un corps qui plonge s un liquide pesant en équilibre tend à faire monter ce corps : le poids tend à le faire descendre : le corps montera ou descendra, s l'action simultanée de ces deux forces, suivant que la première portera sur la seconde, ou réciproquement. Dans le cas où le ds du corps sera plus grand que la résultante des pressions qu'il porte, il tombera : mais le mouvement qu'il prendra ne sera duit que par l'excès de son poids sur l'autre force. C'est ce qu'on once en disant qu'un corps, plongé dans un liquide, y perd une rtion de son poids, égale au poids du liquide déplacé.

§ 268. — Le principe d'Archimède peut être vérifié par l'expé- nce, à l'aide de la balance hydrostatique.

Cette balance, dont le nom est tiré des usages auxquels elle est ployée, présente une disposition particulière, qui permet d'é- ter ou d'abaisser à volonté le fléau, ainsi que les deux plateaux il supporte. A cet effet, le fléau est supporté par une tige qui xêtre à l'intérieur d'une colonne creuse, fixée au pied de la ance, fig. 345 ; cette tige, dentée en forme de crémaillère, en- ne avec un pignon C, à l'aide duquel on peut la faire monter ou

392 PRINCIPES RELATIFS A L'ÉQUILIBRE DES FLUIDES
 descendre. La tige présente en outre, sur sa face opposée
 dents, dans lesquelles pénètre un doigt D, mobile au
 point fixe situé vers son milieu; un petit ressort, et
 l'extrémité inférieure de ce doigt, maintient constamment

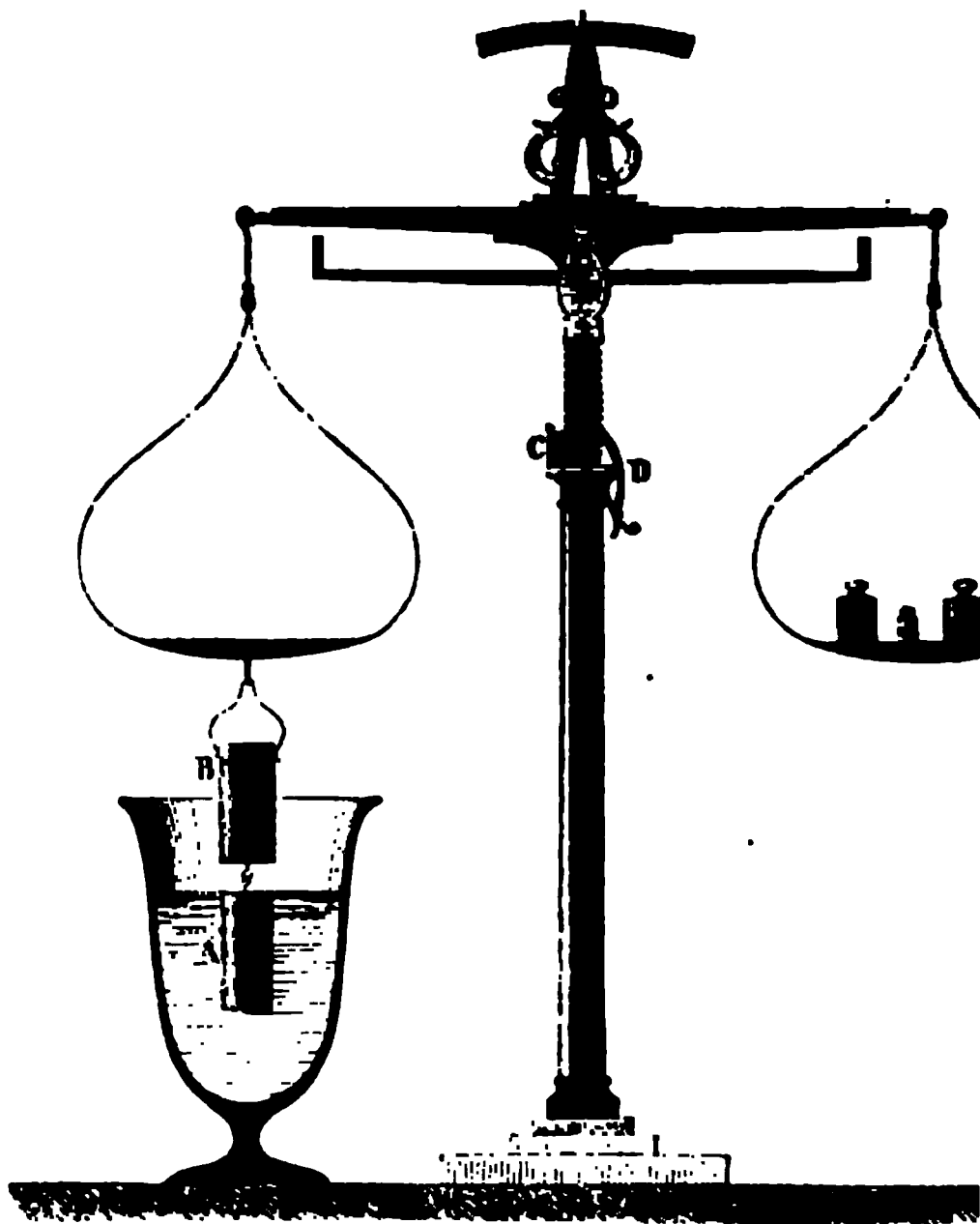


Fig. 315.

trémité supérieure engagée entre les dents. Par cette d
 on peut faire monter la tige qui supporte le fléau, en faisa
 le pignon C, sans que le doigt D s'y oppose; et le doigt
 ensuite le fléau de redescendre, lorsqu'on n'agit plus sur
 Lorsqu'on veut abaisser le fléau, on presse sur l'extré
 rière du doigt D; on fait fléchir le petit ressort, et l'ext
 périeure, en s'écartant des dents de la tige, lui permet de re
 librement.

Voyons maintenant comment on se sert de la balance
 tique pour vérifier le principe d'Archimède. On prend e

A, et un cylindre creux B, dont la capacité intérieure est exactement remplie par le premier. On les suspend l'un de l'autre, comme l'indique la figure, à un crochet au-dessus des plateaux de la balance, et on leur fait équilibre, en mettant des poids dans l'autre plateau. Cela fait, on élève le plateau qui supporte les corps A et B, de manière à faire plonger le cylindre B dans le liquide. Aussitôt que ce cylindre a pénétré un peu dans le liquide, l'équilibre est troublé : le plateau qui supporte les corps A et B n'agit plus assez fortement sur le fléau, pour le maintenir en équilibre au poids de l'autre plateau. Cela tient à ce que le cylindre B, soulevé par le liquide dans lequel il plonge, se trouve dans les mêmes conditions que s'il perdait une portion de son poids. Pour rétablir l'équilibre, il suffit de verser de l'eau dans le cylindre B et l'on voit qu'il ne peut être rétabli, de manière que le cylindre B soit entièrement plongé dans l'eau du vase, *fig. 345*, qu'autant que le cylindre B est entièrement rempli d'eau. On vérifie bien que le corps A, plongé dans l'eau, y perd une portion de son poids, égale au poids de l'eau dont il tient la place.

Lorsqu'un corps solide est abandonné au milieu d'un liquide, il est soumis à l'action de deux forces qui agissent en sens opposés : son poids tend à le faire descendre, tandis que la poussée du liquide tend à le faire monter. La première de ces deux forces est dirigée vers le centre de gravité G du corps, et la seconde force, capable de maintenir le corps en équilibre, est dirigée vers le centre de gravité G' du liquide qui tiendrait la place du corps, si ce liquide était solidifié. On peut regarder cette seconde force comme appliquée au centre de gravité G' de ce liquide. Si le corps était homogène, c'est-à-dire si la matière dont il est composé était répartie uniformément dans tout le volume qu'il occupe (§ 39), son centre de gravité coïnciderait avec le centre de gravité G' du liquide qu'il déplace : mais il n'en est généralement pas ainsi, lorsque le corps n'est pas homogène.

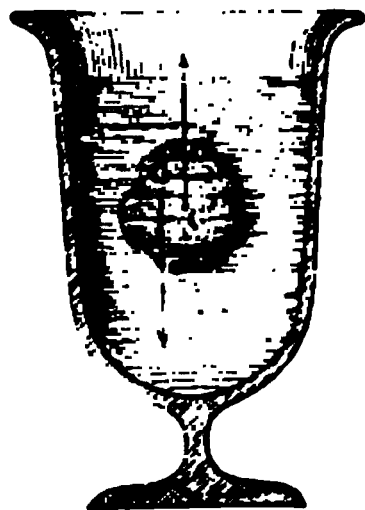


Fig. 346.

qu'un corps solide, placé au milieu d'un liquide, s'y maintienne en équilibre, il faut : 1° que son poids soit égal au poids du liquide qu'il déplace : 2° que les centres de gravité du corps et du



nquie, ne continue pas avec le centre de gravité ou déplacé, l'équilibre sera stable ou instable, suivant de ces deux points sera placé au-dessous ou au-dessus.

Lorsqu'un poisson reste complètement immobile l'eau, il remplit les deux conditions dont nous venons par un moyen quelconque, il vient à augmenter son volume, l'équilibre sera troublé; la poussée devenant plus forte qu'elle n'était précédemment, le poisson sera poussé en haut. Le contraire aura lieu, s'il diminue son volume: la poussée diminuera en même temps, et l'excès de son poids le fera descendre. C'est au moyen d'un organe qu'on nomme la *vesse natatoire*, que certains poissons font ces augmentations et diminutions de leur volume. Elle consiste en une enveloppe fermée qui contient un gaz. En plus ou moins grande, exercée par l'animal sur cette vessie, lui fait éprouver une diminution de volume correspondante, sorte que, par cette seule compression, qu'il fait varier, il peut s'élever ou s'abaisser dans l'eau au milieu de laquelle il est plongé.

Lorsqu'on introduit un grain de raisin dans un verre de Champagne ce grain tombe immédiatement au fond. Mais l'acide carbonique, qui se dégage continuellement, vient bientôt s'arrêter, sous forme de petites bulles, et

au milieu d'un liquide, et si son poids est inférieur au poids du liquide qu'il déplace, il remonte vers la surface. C'est ainsi, par exemple, pour un morceau de liège qu'on au-
 au milieu d'une masse d'eau. Mais lorsque ce corps est parvenu jusqu'à la surface du liquide, il s'y arrête et y prend la position d'équilibre. Dans cette position, il n'est pas entièrement plongé dans le liquide ; il fait saillie au-dessus de sa

surface. On reporte au raisonnement qui a été fait (§ 267) pour arriver au principe d'Archimède, on se rendra compte facilement de la manière dont l'équilibre peut être établi. Le corps, ne plongeant que partiellement dans le liquide, ne doit pas en éprouver une poussée plus grande que s'il y plongeait en totalité. Si le corps était anéanti, le liquide qui remplissait la place de la partie plongée du corps, serait maintenu en équilibre par les pressions exercées sur toute sa surface par le liquide environnant. Ces pressions étant les mêmes que celles que le corps éprouve, on peut dire que la poussée d'un liquide sur un corps partiellement plongé, est égale au poids du liquide déplacé par la partie plongée du corps ; de plus, la force de la poussée peut être supposée appliquée au centre de gravité du liquide déplacé.

La poussée d'un liquide, sur un corps qui est entièrement plongé, est plus grande que le poids du corps, celui-ci monte jusqu'à ce qu'il ait atteint la surface libre du liquide. Dès lors, s'il continue à monter, la partie plongée dans le liquide diminue, la poussée du liquide sur le corps diminue en conséquence, et l'on conçoit un moment où cette poussée, qui était plus grande que le poids du corps, devient égale. Si le corps continue à monter, la force qui le pousse en haut diminuera encore ; son mouvement s'arrêtera sur cette force, et détruira son mouvement ascendant pour le faire cesser. Le corps viendra ainsi prendre la position

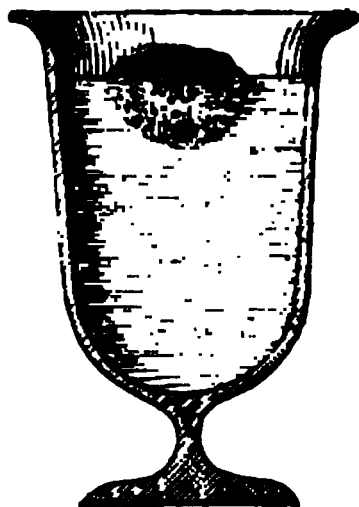


Fig. 347.

d'équilibre, dans laquelle il se maintiendra en flottant sur le liquide. Pour que cet équilibre existe, il faut : 1° que le poids du corps soit égal au poids du liquide que déplace sa partie plongée ; 2° que le centre de gravité G du corps, fig. 347,

et le centre de gravité G' du liquide déplacé, soient situés sur même verticale.

On voit par là que, pour qu'un corps puisse flotter sur un liquide, il faut que son poids soit inférieur au poids d'une quantité de liquide qui aurait le même volume que lui; et que, à égalité de volume, des corps flottants déplaceront d'autant moins de liquide par suite seront d'autant plus saillie au-dessus de la surface du liquide, que ces corps seront moins pesants.

§ 271. Les conditions qui viennent d'être énoncées sont nécessaires et suffisantes pour qu'un corps flottant soit en équilibre: l'équilibre peut être stable ou instable, suivant les cas. Lorsque nous avons parlé de l'équilibre d'un corps entièrement plongé dans un liquide (§ 269), nous avons dit que l'équilibre serait stable ou instable, suivant que le centre de gravité du corps se trouverait dessous ou au-dessus du centre de gravité du liquide déplacé: n'en est plus de même ici: la stabilité de l'équilibre ne dépend que le premier de ces deux points soit inférieur au second, ainsi nous allons le reconnaître.

Examinons d'abord ce qui arriverait dans le cas d'un cylindre à petit diamètre, formé de deux parties de densités très différentes



Fig. 318.

et réunies bout à bout, fig. 318. Admettons que ce corps ait été construit de manière à pouvoir flotter dans un liquide, en se plaçant verticalement, et en ayant son centre de gravité au dessous de celui du liquide qu'il déplace. Si l'on incline le cylindre d'un côté ou d'un autre, comme l'indique la figure, il se redressera immédiatement sous l'action des deux forces qui lui sont appliquées, et dont l'une est son poids qui agit de haut en bas sur son centre de gravité G , et l'autre est la poussée du liquide agissant de bas en haut sur le centre de gravité G' du liquide déplacé. L'équilibre est donc stable, et il en sera de même, quel

que soit la forme du corps, pourvu que le point G se trouve au dessous du point G' .

Voyons maintenant ce qui arrivera, si le corps flottant est homogène et a la forme d'un parallélépipède rectangle aplati, fig. 319. Ce sera, par exemple, un morceau de liège qu'on fera flotter sur l'eau. Ce morceau de liège se placera naturellement de manière que ses deux plus grandes faces soient horizontales. La partie plongée dans l'eau aura donc aussi la forme d'un parallélépipède rectangle

cavité G et G' du corps et du liquide déplacé, n'est que les centres de figure des deux parallépipèdes, et nécessairement placé au-dessus de G' : et cependant l'équilibre n'est pas à quoi cela tient. Le centre de gravité d'un morceau de liège conserve sa position variable à l'intérieur de ce morceau, quelle que manière qu'on déplace le liège ; le centre de gravité G' du liquide déplacé, s'il coïncidait avec le même point du morceau de liège, si l'on en inclinait ce corps d'un angle quelconque, la ligne GG' s'inclinerait avec le corps, et que les forces qui agissent sur G et G' , la première de haut en bas, la seconde de bas en haut, feraient basculer le morceau de liège dans une autre position d'équilibre. Mais ce n'est pas ce qui se passe. Aussi, lorsque un morceau de liège est dérangé de sa position d'équilibre, le liquide qu'il déplace se porte vers le centre de gravité G' de ce liquide, et non pas vers le centre de gravité G du liège ; donc, dans le corps, une fois que le centre de gravité G' du liquide déplacé a été incliné vers la droite, le point G' ne se transporte pas vers la droite, la verticale menée par le point G ne fait s'il suivait le corps dans sa nouvelle position ; mais il se porte vers la gauche, car les forces qui sont appliquées à G et G' tendent à ramener le corps dans la position d'équilibre.

Il résulte de ce qui précède, que la stabilité de l'équilibre ne dépend pas de ce que le centre de gravité de ce corps soit au-dessous de celui du liquide qu'il déplace. L'équilibre n'est stable que si cette condition est remplie ; mais il pourra y avoir aussi un équilibre, sans qu'elle le soit.

On prend des aiguilles à coudre, qu'on les passe plusieurs fois entre les doigts, pour les entourer d'une très légère couche d'huile ; on les pose avec soin sur la surface de l'eau contenue dans un vase, on voit ces aiguilles se maintenir sur cette surface, comme si elles étaient formées d'une matière

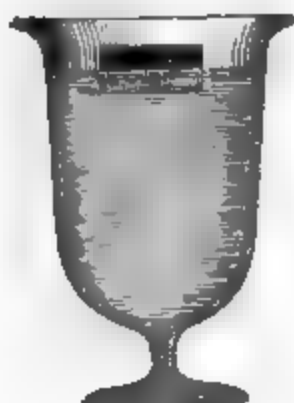
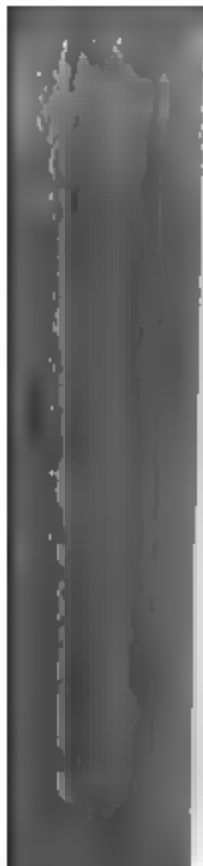


Fig. 340.



Fig. 350.



(fig. 312, page 344). Cette dépression capillaire de l'eau, déterminée par la présence de l'aiguille, donne lieu d'une sorte de sillon dans lequel l'aiguille est placée en raison de la légère couche de graisse dont on l'a revêtue. On lui a donné la propriété de ne pas être mouillée par le liquide, donc un volume de liquide plus grand que son propre volume, on conçoit que la quantité de liquide ainsi déplacée pèse plus que le poids de l'aiguille. En sorte que cette aiguille, dans les mêmes conditions qu'un corps de même poids, le volume serait plus que suffisant pour remplir la cavité dont nous venons de parler ; ce corps serait moins dense que le liquide et flotterait sur sa surface, conformément au principe d'Archimède.

Cette assimilation de l'aiguille à un corps moins dense que le liquide, qui remplirait la totalité du sillon que sa présence détermine dans l'eau, peut ne pas paraître bien légitime. Un corps plongé dans un liquide est pressé par le liquide, dans toute l'étendue de sa surface, d'une pression qui est égale à son poids. La résultante de toutes ces pressions qui constitue la poussée d'Archimède, est toujours égale au poids du corps déplacé. Dans le cas d'une aiguille qui flotte sur l'eau, on ne voit pas que le liquide presse l'aiguille dans toute l'étendue des parois de la cavité qu'elle occupe, puisqu'elle n'occupe qu'une partie de la

pression sur sa base, soit que l'aiguille s'y trouve placée à la surface de l'eau, soit qu'elle soit enlevée, et que le sillon qu'elle a formé soit rempli d'eau de manière à rétablir l'horizontalité dans l'étendue de la surface libre. Il résulte évidemment de là que le poids de l'aiguille est égal au poids du liquide capable de remplir le sillon qu'elle forme; ou bien encore, que la poussée du liquide sur l'aiguille est égale au poids du liquide total qui est déplacé, tant par l'aiguille que par l'effet de l'action capillaire que sa présence détermine. C'est de la même manière qu'on explique que certains insectes marchent sur l'eau, *fig. 351*, sans que leurs pattes pénètrent à l'intérieur du liquide.

Les pattes de ces insectes sont dans de telles conditions coniques pour ne pas se mouiller. Lorsqu'elles viennent à se appuyer sur la surface de l'eau, elles occasionnent des dépressions de cette surface; et l'insecte est en équilibre, lorsque les dépressions ainsi par ses diverses pattes sont tels que l'eau qui remplirait pèse autant que lui.

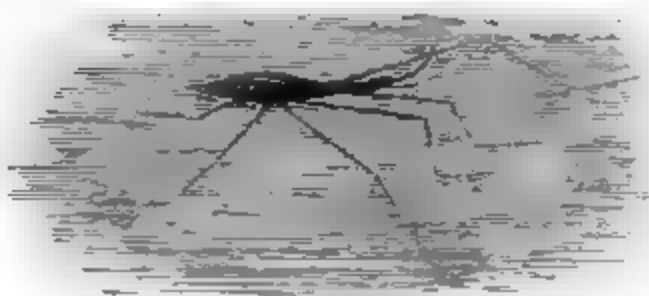


Fig. 351.

73. Mesure des densités. — Le principe d'Archimède fournit un moyen très simple de déterminer la densité d'un corps solide ou liquide; c'est-à-dire de trouver le rapport du poids du corps à celui d'un égal volume d'eau. Pour cela on peut se servir de la balance hydrostatique, *fig. 345* (page 392).

Si l'on a un corps solide, on le suspend au-dessous de l'un des plateaux de la balance, à l'aide d'un fil très délié; et on lui fait équilibre en mettant des poids marqués dans l'autre plateau. De cette manière, on obtient le poids du corps, tout aussi bien que si, au lieu de le suspendre au crochet dont est muni l'un des plateaux, on l'appuyait sur ce plateau. En opérant ensuite comme il a été dit dans le paragraphe 268, on fait plonger le corps dans un vase qui contient de l'eau. L'équilibre est troublé: et on le rétablit en ôtant une portion des poids marqués qui faisaient équilibre au corps. Les poids restants servent de mesure au poids du corps, lorsqu'il est dans l'eau, c'est-à-dire au poids du corps diminué du poids d'un égal volume d'eau. Donc en divisant le poids du corps par la perte que ce corps éprouve lorsqu'on a fait plonger le corps dans l'eau, on

aura la densité de ce corps. Si, par exemple, le corps dont trouver la densité pèse 25^{gr}, 72 hors de l'eau, et 18^{gr}, 37 de la perte de poids sera de 7^{gr}, 35 ; et la densité sera égale à bien à 3, 5.

Pour déterminer la densité d'un liquide, on prendra un solide quelconque que l'on suspendra à l'un des plateaux de la hydrostatique ; puis, après avoir pesé ce corps, on cherchera les pertes de poids qu'il éprouve, lorsqu'on le fait successivement dans l'eau et dans le liquide que l'on considère. Les deux pertes de poids sont les poids d'une masse d'eau et d'une masse de l'autre liquide, ayant toutes deux le même volume que le corps solide employé. Si l'on divise la seconde perte de poids par la première, on aura bien le rapport du poids d'un certain volume du liquide dont on s'occupe, au poids d'un égal volume d'eau, c'est-à-dire la densité de ce liquide.

Le poids d'un volume d'eau égal au volume du corps dont trouver la densité varie avec la température de l'eau ; aussi la densité du corps ne peut-elle être définie exactement qu'à l'égard de l'eau qui sert de terme de comparaison est supposée avoir une température déterminée. Lorsqu'on trouve la densité d'un corps ou d'un liquide par les moyens qui viennent d'être indiqués, il est nécessaire de corriger le résultat obtenu, en raison de la température de l'eau qu'on a employée n'était pas celle qui suppose dans la définition des densités. Nous n'indiquerons pas la manière de faire cette correction, pour laquelle on peut se reporter aux traités de physique ; nous nous contenterons de dire que dans un grand nombre de circonstances, cette correction n'est pas nécessaire, et que même, au lieu de se servir d'eau pure, on peut se servir d'eau ordinaire. L'erreur qui en résultera sera très petite, et le degré d'approximation avec lequel la densité du corps sera obtenue sera généralement suffisant. C'est ce qui par exemple, si l'on cherche la densité d'un corps, pour s'en servir à l'évaluation approximative du poids d'un grand volume de ce corps, ainsi que nous l'avons fait pour l'obélisque de Luxor.

§ 274. **Aréomètres.** — Les densités des corps peuvent être obtenues à l'aide d'instruments spéciaux, qui sont désignés sous le nom d'*aréomètres*. On distingue les aréomètres à volume constant et les aréomètres à poids constant.

Les aréomètres sont en général des instruments disposés de manière à pouvoir flotter, soit sur l'eau, soit sur d'autres liquides, auxquels on donne le nom d'*aréomètres à volume constant*. Ils sont chargés de poids additionnels, de manière à s'enfoncer

ours de la même quantité. La fig. 352 représente un de ces aréomètres. Il se compose d'un corps creux supportant inférieurement un corps et surmonté d'une cuvette C qui lui est attachée par une tige déliée. Sur la tige se trouve un point D, qu'on nomme point d'affleurement. Lorsqu'on introduit cet aréomètre dans un vase rempli d'eau, il flotte en se réglant verticalement : cela tient à ce que le poids ordinairement de plomb, fait fonction que le centre de gravité de l'instrument se trouve plus près de ce corps que le centre de gravité de l'eau déplacée. Mais si l'on n'a pas chargé la cuvette C de poids, le point d'affleurement D reste très haut au-dessus de la surface de l'eau. On emploie cet instrument à la détermination de la densité d'un corps solide, on le plonge dans un vase plein d'eau, et l'on charge la cuvette C de poids en quantité convenable pour que le point D soit exactement au niveau de la surface de l'eau : on dit alors que l'instrument est affleuré. On pose ensuite, sur la cuvette, le corps dont on veut trouver la densité, on enlève en même temps des poids, jusqu'à ce que l'affleurement subsiste. Il est évident que les poids qu'on a enlevés représentent le poids du corps, et si se trouve ainsi déterminé tout aussi bien qu'avec une balance. La fait, on retire le corps de la cuvette, et on l'introduit seul dans le vase B, dans une espèce de panier destiné à le contenir. Le corps se trouve détruit par là, puisque le corps, actuellement immergé dans l'eau, y perd une portion de son poids égale au poids de l'eau déplacée ; on rétablit cet affleurement en ajoutant des poids sur la cuvette, et ces poids, qu'on est ainsi obligé d'ajouter, représentent le poids d'une quantité d'eau ayant le même volume que le corps immergé : 1^o le poids du corps, 2^o le poids d'un égal volume d'eau. On suffit de diviser le premier nombre par le second, pour trouver la densité du corps.

On d'observer que l'instrument est doué d'une sensibilité plus grande, et fournit en conséquence des résultats d'autant plus exacts, que la tige sur laquelle est marqué le point d'affleurement est plus déliée. On voit en effet que, si l'on ajoute un

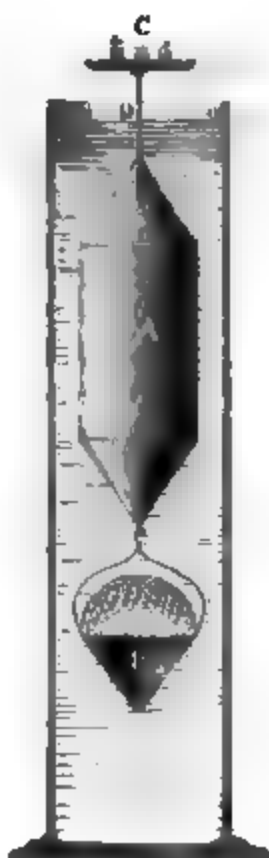


Fig. 352.

petit poids sur la cuvette, l'aréomètre doit s'enfoncer dans l'eau, de manière à déplacer une nouvelle quantité d'eau dont le poids est égal au poids qu'on a ajouté. Mais l'aréomètre, en s'enfonçant, quoiqu'il est à peu près affleuré, ne déplace une nouvelle quantité d'eau qu'en raison de ce qu'une portion de sa tige s'abaisse au-dessous de la surface de l'eau; l'enfoncement produit par une même augmentation de poids de l'instrument sera donc d'autant plus grand que la section transversale de cette tige sera plus petite. Par exemple, la surface de cette section transversale était égale à 4 millimètre carré, une addition de 4 milligramme sur la cuvette ferait enfoncer la tige d'une longueur de 4 millimètre; puisque, par là, le volume d'eau déplacé augmenterait de 4 millimètre cube, et qu'un pareil volume d'eau pèse 4 milligramme.

Pour employer le même instrument à la détermination de la densité d'un liquide autre que l'eau, on le plonge successivement dans l'eau et dans ce liquide, en ayant soin de produire l'affleurement, dans chacun des cas, à l'aide de poids placés sur la cuvette. En ajoutant le poids de l'aréomètre lui-même au poids qu'on a dû mettre sur la cuvette pour l'affleurer, lorsqu'il était dans l'eau, on aura le poids de l'eau déplacée par l'instrument, dans cette circonstance. Le poids d'un égal volume du liquide dont on veut trouver la densité s'obtiendra de même en ajoutant le poids de l'aréomètre au poids dont on a dû le charger pour l'affleurer dans ce liquide. En divisant le second de ces deux résultats par le premier, on aura la densité cherchée.

§ 275. Les aréomètres à poids constant servent uniquement à faire connaître la densité des liquides, et sont souvent désignés sous le nom de *pèse-liqueurs*. Ils sont ordinairement de verre, et sont formés d'une partie renflée et creuse *a*, *fig.* 353, d'une tige graduée *b* qui la surmonte, et d'une boule inférieure *c* contenant du mercure qui fait fonction de lest. Un pareil instrument, étant introduit dans un liquide, ne s'y enfonce pas complètement; il flotte à la surface, et se maintient verticalement. Il faut, pour qu'il soit en équilibre, que le poids du liquide qu'il dé-

place soit égal à son propre poids. Il s'enfoncera donc d'autant moins dans le liquide, que celui-ci sera plus dense; et

l'on conçoit que la densité du liquide pourra être indiquée par le point de la tige *b* qui s'arrêtera au niveau de la surface libre de ce liquide.

Le mode de graduation de la tige *b* d'un aréomètre à poids constant varie beaucoup, suivant les usages auxquels l'aréomètre est



Fig. 353.

. S'il doit donner immédiatement la densité d'un liquide, on marque à côté de chaque division de la tige, la densité du liquide dans lequel l'instrument s'enfonce jusqu'à cette division. S'il doit indiquer la proportion plus ou moins grande d'eau qu'on a mélangée dans du lait, ce qui fait varier en conséquence la densité du liquide, on marque sur la tige les points où l'instrument s'affleure lorsqu'il est plongé dans du lait contenant moitié, un tiers, etc.... d'eau.

Un grand nombre d'aréomètres, en usage dans le commerce, sont gradués d'après des règles de pure convention, indiquées par des tables, et sont désignés sous le nom d'*aréomètres de Beaumé*. Ces aréomètres sont de deux espèces, suivant qu'ils servent à peser des liquides plus denses ou moins denses que l'eau. Pour graduer les aréomètres, ceux qui servent aux liquides plus denses que l'eau, on les met dans l'eau, et l'on marque zéro au point d'affleurement; on les met ensuite dans un liquide formé par la dissolution de 45 parties de sel marin dans 85 parties d'eau, et l'on marque 45 au point d'affleurement; enfin on divise l'intervalle de ces deux points en 15 parties égales, que l'on nomme *degrés*, et l'on prolonge cette division au-dessous du point qui porte le 45^e degré, jusqu'à l'extrémité inférieure du tube. Pour graduer les aréomètres destinés aux liquides moins denses que l'eau, on les met dans une dissolution formée de 10 parties de sel marin et de 90 parties d'eau, et l'on marque 10 au point d'affleurement; on les introduit ensuite dans l'eau pure, et l'on marque 0 au point d'affleurement; enfin, on divise l'intervalle compris entre ces deux points en 10 parties égales que l'on nomme aussi degrés, et l'on prolonge la division jusqu'à l'extrémité inférieure du tube.

176. Navigation. — Les bateaux et les navires, dont on se sert pour effectuer des transports par eau, sont des corps flottants qui sont soutenus à la surface de l'eau par la poussée que le liquide exerce sur toute la partie immergée de leur surface. Ils doivent donc déplacer une quantité d'eau dont le poids soit égal à leur propre poids. On voit par là qu'il n'y a pas de limite pour le poids qu'on peut donner à un navire, y compris son chargement: quelque grand soit son poids, il flottera toujours, pourvu que sa forme lui permette de déplacer une quantité d'eau suffisamment grande.

Quand un navire présente des conditions convenables de stabilité, et qu'il ne court pas le risque d'être renversé sur le côté, lorsqu'il est dérangé de sa position d'équilibre, il est indispensable que son centre de gravité se trouve le plus bas possible. C'est pour cela qu'on place, à la partie inférieure, des matières pesantes qui consti-

tuent le *lest*. Cependant on ne peut pas généralement le centre de gravité du navire à être situé au-dessous du centre de gravité du liquide qu'il déplace, dans la position d'équilibre; donc que la forme du navire soit disposée de telle sorte que malgré cette circonstance défavorable à la stabilité la poussée du liquide tende toujours à le relever, de qu'il ait été incliné par l'action d'une cause extérieure (§ 276).

Le *tonnage* d'un navire s'évalue d'après la quantité de liquide qu'il peut déplacer, sans cesser d'être dans de bonnes conditions; c'est-à-dire d'après le poids total qu'il peut avoir, qui est toujours égal au poids du liquide qu'il déplace. L'unité que l'on adopte dans ce cas est la tonne, ou le tonneau, qui pèse 1000 kilogrammes (§ 17). Quand on dit qu'un navire peut porter 1000 tonnes, cela veut dire que son poids peut être porté par 1000 tonnes; ou bien encore qu'il peut marcher sur 200 mètres cubes d'eau.

A mesure que l'on charge un navire, il s'enfonce dans l'eau et déplace une nouvelle quantité d'eau, qui soit en rapport avec le croissement de sa charge. Mais l'enfoncement qu'il éprouve est d'autant plus faible que sa *surface de flottaison* est plus grande; on donne ce nom à l'étendue de la section horizontale du navire par la surface libre du liquide prolongée à son niveau. Si cette surface était de 400 mètres carrés, un accroissement de 1000 kilogrammes dans la charge du navire le ferait s'enfoncer d'un centimètre; puisqu'il devrait déplacer un mètre cube d'eau, que précédemment, et qu'un cylindre dont la base est de 400 mètres carrés doit avoir une hauteur d'un centimètre, son volume soit d'un mètre cube.

Les exemples numériques qui viennent d'être donnés supposent que l'eau sur laquelle flotte le navire est de l'eau pure de l'eau ordinaire; ils sont applicables à la navigation sur mer. La densité de l'eau de mer est 1,026; un mètre cube d'eau de mer pèse donc 1026 kilogrammes, et une masse de la mer qui pèse une tonne, n'occupe qu'un volume de 0^m^c,975. On voit par là de quelle manière les résultats précédents doivent être modifiés pour pouvoir s'appliquer à la navigation sur mer.

§ 277. Comme exemple remarquable de l'emploi de l'équilibre pour effectuer des transports, nous citerons le moyen employé par les Égyptiens pour le transport de leurs obélisques. Quand un obélisque avait été taillé dans la carrière même d'où on devait l'extraire, on creusait un canal s'étendant sous lui jusqu'à la mer; qu'il ne s'appuyait plus sur le sol que par ses deux extrémités.

Il se remplissait d'eau, lors de la crue du Nil. On amenait alors des bateaux chargés de briques, et on les faisait passer sous l'obélisque, fig. 354 : puis on les déchargeait en envoyant les briques. Les bateaux, ainsi al-

lignés, s'élevaient progressivement : bientôt ils avaient la face supérieure de l'obélisque, et ils ne pouvaient plus avancer lorsqu'on les avait retirés assez

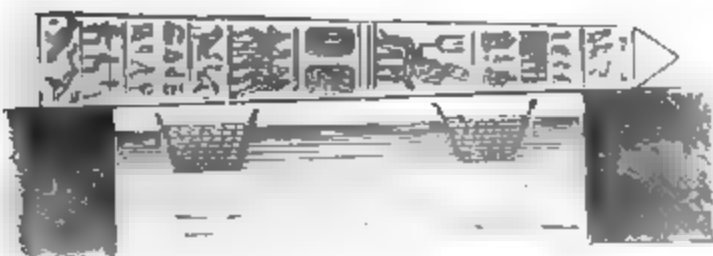


Fig. 354.

briques pour qu'ils pussent soulever l'obélisque. Le monolithe ainsi chargé sur les bateaux, on le transportait facilement à destination, où l'on pouvait le déposer, en opérant d'une manière égale, mais inverse.

§ 278. Lorsqu'un navire, d'un fort tirant d'eau, ne peut pas pénétrer dans un port, à cause du manque d'eau, on le soulève à l'aide de bateaux plats nommés *chameaux*, que l'on place de chaque côté. Les bateaux sont disposés de manière à venir s'adapter contre les flancs du navire. Des câbles que l'on a fait passer sous sa quille s'enlèvent de part et d'autre, et viennent aboutir à des cabestans fixés sur le pont des chameaux. En manœuvrant ces cabestans, on soulève le navire, dont le poids est porté en partie par les chameaux. Ceux-ci s'enfoncent en même temps : et lorsque le navire a été suffisamment sorti de l'eau, on l'introduit dans le port, avec les deux chameaux, comme si le tout ne formait qu'un seul bâtiment. Ce moyen, employé surtout en Hollande, consiste, comme on voit, à diminuer le tirant d'eau du navire, en augmentant sa surface de flottaison par l'adjonction des chameaux. De cette manière le navire déplace plus d'eau, puisque son poids a été augmenté du poids des chameaux : mais le volume de l'eau déplacée s'étend beaucoup plus dans le sens horizontal, et sa profondeur est moindre que dans le cas où le navire était seul.

§ 279 *Canaux*. — Pour effectuer des transports par eau, dans des contrées où il n'existe pas de rivières navigables, on a creusé des canaux destinés à en tenir lieu. Habituellement l'eau d'un canal est à peu près stagnante, et alors sa surface est plane et horizontale. Quelquefois cependant l'eau coule dans le canal, avec une vitesse comparable à celle qu'on observe dans les rivières, et en conséquence sa surface doit présenter une inclinaison, ainsi que nous le

verrons bientôt : mais cette inclinaison est toujours est faible. Il semble donc, au premier abord, qu'on ne puisse canal que dans un pays plat ; sans quoi le niveau de l'eau serait, dans certains cas, à une trop grande distance au-dessus de la surface du sol environnant, ce qui présenterait de graves inconvénients de plusieurs sortes. Mais il n'en est rien : on peut établir dans un pays accidenté, tout aussi bien que dans un pays plat, et être disposé de manière que le niveau de l'eau se trouve à une petite distance de la surface du sol voisin.

Pour arriver à ce résultat, on forme le canal de plusieurs biefs placés à la suite les uns des autres, et dans lesquels le niveau de l'eau doit être différent ; et l'on réunit ces diverses parties par des écluses, qui sont destinées à faire passer les bateaux d'un bief à un autre. Soient A, fig. 355, le bief supérieur, et B le bief



Fig. 355.

L'écluse consiste en un bout de canal C, qui est séparé des biefs A, B, par des portes D, E, susceptibles de s'ouvrir et de se fermer à volonté, et qui peut de cette manière être mis en communication avec l'un ou l'autre de ces deux biefs. Les dimensions de l'écluse C, en largeur et en longueur, ont été choisies de manière qu'elle puisse contenir les plus grands bateaux qui doivent passer sur le canal. Quant à sa profondeur, elle doit être telle que les bateaux puissent y entrer, lorsque l'eau y est au niveau du bief supérieur A. Ses parois doivent s'élever assez haut, pour ne pas être détrempées par le niveau de l'eau dans le bief A.

Pour faire passer un bateau du bief inférieur B dans le bief supérieur A, on ferme les portes D, et l'on ouvre les portes E. L'eau monte au même niveau en B et en C, on peut amener le bateau dans le bief supérieur de l'écluse. Alors on ferme les portes E, et l'on établit la communication entre le bief supérieur A et l'écluse ; le niveau de l'eau monte dans l'écluse, et fait monter le bateau

veau est devenu le même en C et en A, on ouvre les portes D, et on peut faire passer le bateau dans le bief supérieur. Une opération inverse qu'on fait passer un bateau de A en C : on ferme les portes E étant fermées, et les portes D ouvertes, le niveau de l'eau en A et en C : on amène le bateau dans l'écluse, puis on ouvre les portes D. On fait alors baisser le niveau de l'eau dans le bief supérieur par une communication qui permette au liquide de passer de A en B, puis on ouvre les portes E, et enfin on fait passer le bateau en C.

On voit, chaque fois qu'un bateau traverse l'écluse, soit en descendant, soit en montant, on est obligé de faire couler, du bief supérieur dans le bief inférieur, la quantité d'eau que peut contenir la différence des niveaux de ces deux biefs. Lorsque plusieurs biefs sont à la suite les uns des autres, de plus en plus bas, et sont composés de écluses de mêmes dimensions, le passage d'un bateau des extrémités du canal à l'autre extrémité, détermine l'écoulement de la quantité d'eau dont nous venons de parler du bief le plus élevé, jusqu'au bief le plus bas. Lorsqu'un canal doit franchir une montagne, en s'élevant sur un des versants et en descendant sur l'autre versant, il existe vers la crête de la montagne un bief situé au-dessus de tous les autres; c'est de ce bief qu'il s'écoule la quantité d'eau nécessaire au passage des bateaux, soit que les bateaux montent d'un côté, soit qu'ils redescendent de l'autre. Il faut donc que ce bief culminant soit alimenté, ou par une source d'eau, ou par les eaux pluviales qu'on accumule à cet effet dans de vastes immenses réservoirs. C'est pour diminuer autant qu'on le peut la perte d'eau qui résulte du passage des bateaux par les écluses, qu'on donne à celles-ci les plus petites dimensions possibles. Mais pendant qu'elles cessent de pouvoir contenir les plus grands bateaux, ils marchent sur le canal.

Nous avons dit que, lorsqu'un bateau avait été amené du bief inférieur B dans l'écluse C, on devait fermer les portes E, puis ouvrir la communication entre l'écluse et le bief supérieur A, afin que le niveau de l'eau devienne le même de part et d'autre des portes D. On pourrait croire qu'il n'y a pas autre chose à faire pour ouvrir ces portes D; il est évident en effet que, si on les ouvre, l'eau s'emplirait, et le bateau serait élevé immédiatement dans le bief supérieur. Mais si l'on y réfléchit, on verra qu'il est extrêmement difficile d'ouvrir les portes D, avant que l'égalité de niveau fût établie de part et d'autre. Admettons, pour fixer l'idée, que chaque porte ait 2 mètres de hauteur, et autant de largeur, et qu'elle est touchée dans toute sa hauteur par l'eau du bief

506 PRINCIPES RELATIFS A L'ÉQUILIBRE DES FLUIDES.

supérieur, et que le niveau de l'eau dans l'écluse ne l'atteigne aucun point, elle aura à supporter de la part du liquide (§ 225) une pression égale au poids d'un cylindre d'eau dont la base est de 1 mètre carré (surface de la porte), et dont la hauteur est de 1 mètre au-dessus du centre de la porte, au-dessus du centre de la surface pressée). Cette pression, qui sera de 4000^k, produit le même effet qu'une force de même intensité appliquée au tiers de cette ligne à partir de son côté inférieur (§ 222). On par là qu'on ne pourrait ouvrir la porte dont il s'agit, et que la pression qui la maintient fermée, qu'on lui applique une extrêmement grande. Pour que les deux portes puissent résister à une si énorme pression, on les construit avec une grande solidité, on les dispose de manière qu'elles s'arc-boutent l'une contre l'autre lorsqu'elles sont fermées, fig. 355 : par ce moyen, on voit

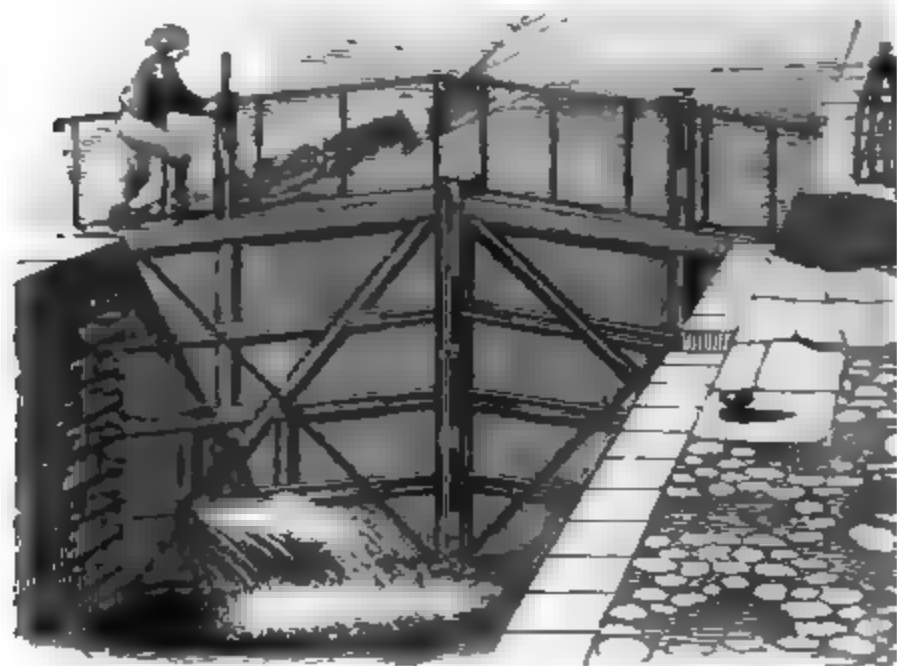


Fig. 355.

les portes ne pourraient céder à l'action du liquide qu'en ébranlant les massifs de maçonnerie qui forment les deux côtés de l'écluse.

Pour éviter d'avoir à vaincre la résistance extrêmement grande dont nous venons de parler, on n'ouvre les portes d'écluse qu'après avoir amené le niveau de l'eau à être le même sur leurs deux faces. On ouvre d'abord une sorte de vanne qui ferme une ouverture pratiquée vers la partie inférieure de chaque porte. Cette vanne est fixée à une crémaillère de fer, qui monte verticalement le

de la porte : un pignon engrène avec cette crémaillère, et le pignon est muni d'une manivelle. En faisant tourner la manivelle, on soulève la vanne sans peine, *fig. 356* ; l'eau du bief supérieur se précipite dans l'écluse par l'ouverture qui lui est ainsi faite ; le niveau de l'eau s'élève progressivement dans l'écluse, et quand il est devenu le même que le niveau dans le bief supérieur, on peut ouvrir les portes.

Les portes qui existent entre l'écluse et le bief inférieur présentent une disposition entièrement pareille, afin qu'on puisse faire passer l'eau de l'écluse dans le bief inférieur, avant qu'on les ouvre.

§ 284. Influence de l'air sur le poids d'un corps. — Tous les corps qui nous environnent sont placés au milieu de l'air atmosphérique. Cet air exerce une pression sur chaque partie de leur surface ; ils se trouvent donc dans des conditions analogues à celles d'un corps plongé dans un liquide. Aussi peut-on répéter dans ce cas le raisonnement du § 267, et l'on en conclura qu'un corps, placé au milieu de l'air atmosphérique, perd une portion de son poids égale au poids de l'air qu'il déplace.

On peut vérifier ce résultat par l'expérience suivante. Deux boules de cuivre, dont l'une est creuse, et l'autre pleine, ont été disposées de telle manière qu'étant suspendues aux extrémités d'un petit bras de balance, *fig. 357*, elles se fassent équilibre, et que le fléau reste horizontal. On introduit le tout sous le récipient d'une machine pneumatique, et on fait le vide. On voit alors que l'équilibre n'existe plus ; la boule creuse, qui est plus grosse que l'autre, s'abaisse et fait monter la boule pleine. Cela tient à ce que chaque boule perdait dans l'air une portion de son poids égale au poids de l'air qu'elle déplaçait. La plus grosse des deux boules, en déplaçant plus d'air que l'autre, éprouvait en même temps une plus forte diminution de poids qu'elle ; et puisque les poids des deux boules, ainsi diminués de quantités inégales, se faisaient équilibre en étant aux extrémités de deux bras de levier égaux, il s'ensuit que le poids de la plus grosse des deux boules est réellement plus grand que celui de la petite. L'équilibre ne doit donc plus exister, lorsqu'on retire l'air qui les enveloppe, et qu'on les soustrait ainsi à la pression qu'il exerçait sur elles.

Lorsqu'on effectue des pesées destinées à fournir des résultats avec une grande précision, il est nécessaire de tenir compte de la diminution de poids que subissent les corps dans l'air.

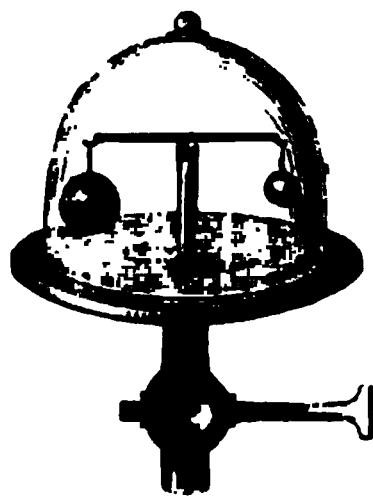
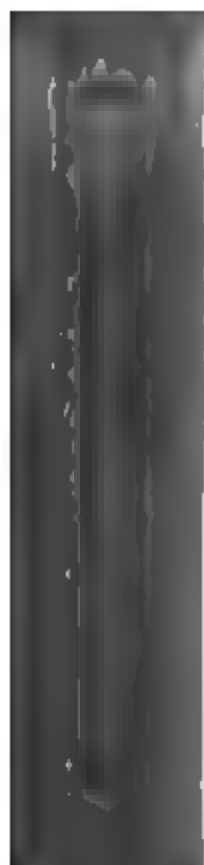


Fig. 357.

Lorsqu'on effectue des pesées destinées à fournir des résultats avec une grande précision, il est nécessaire de tenir compte de la diminution de poids que subissent les corps dans l'air.

Lorsqu'on effectue des pesées destinées à fournir des résultats avec une grande précision, il est nécessaire de tenir compte de la diminution de poids que subissent les corps dans l'air.



se maintenir dans la position qu'il occupe, sans autre effet que son poids soit précisément égal à la poussée d'air qu'il exerce sur sa surface. C'est ce qui arrive pour les nuages qui ne se maintiennent à une certaine hauteur au-dessus du sol que parce qu'ils sont soutenus par l'air. Si l'air atmosphérique disparaissait, les nuages tomberaient à l'instant même, tels qu'une pierre ou une balle de plomb.

Si le poids d'un corps est moindre que le poids de l'air qu'il déplace, la force qui tend à le faire monter l'emporte sur celle qui tend à le faire descendre ; il doit donc s'élever dans l'air. C'est de même qu'un morceau de liège, qu'on a placé au fond d'un verre d'eau, remonte à la surface, aussitôt qu'on l'abandonne à lui-même. De cette manière que nous voyons la fumée s'élever et le gaz, dont elle est en grande partie formée, se dilater sous l'influence de la chaleur, et il en résulte que sa densité est plus faible que celle de l'air environnant, ou bien encore que son poids est moindre que le poids de l'air qu'elle déplace.

Montgolfier eut l'idée de profiter de la force ascensionnelle de la fumée, pour élever, dans l'atmosphère, des corps pesants, tels que des hommes. Il construisit pour cela une enveloppe de grande dimension, fermée de toutes parts, excepté à l'inférieure, où elle présentait une ouverture circulaire ; si

ent à se faire élever eux-mêmes dans l'atmosphère. Les premiers qui entreprirent ce voyage d'un nouveau genre sont Pilâtre de Rozier et le marquis d'Arlandes. Leur montgolfière, fig. 358,



Pl. 358.

richement ornée, se terminait inférieurement par une galerie latérale destinée à recevoir les voyageurs. Un réchaud était suspendu intérieurement et à leur portée; en sorte qu'ils pouvaient, pendant leur voyage, y jeter de temps en temps de la paille, dont ils faisoient une provision, afin de rendre à leur machine la force élastique que le refroidissement lui faisoit perdre. Cette ascension mémorable eut lieu sans accident, le 21 novembre 1783, dans le jardin de la Muette, près Paris.

283. Au lieu de remplir l'intérieur du ballon avec de la fumée d'air chaud, on peut y introduire un gaz naturellement plus

légère que l'air, tel que l'hydrogène. Cette idée, qui n'est due qu'à Montgolfier, fut mise en pratique par Charles, qui en fit la première expérience publique à Paris, au Champ de Mars, le 15 août 1783. Le 4^{re} décembre suivant, il s'éleva lui-même dans un ballon, accompagné de Robert, au moyen d'un ballon à gaz.

Cette nouvelle espèce d'aérostats présente des avantages sur les montgolfières. D'une part, la légèreté relative du ballon n'a pas besoin d'être entretenue par un foyer placé sous le ballon; et par suite on peut prolonger un voyage aérostatique sans être obligé de porter avec soi une grande quantité de matières combustibles, comme cela arrive lorsqu'on se sert de montgolfière. D'une autre part, la présence de ce foyer

dessous d'une montgolfière occasionnerait un incendie, les effets seraient terribles; la suppression de ce foyer est donc un point de vue, d'une très grande importance.

Lorsqu'un ballon de ce genre est destiné à recevoir des voyageurs, on l'enveloppe d'un filet qui recouvre presque complètement le ballon à sa partie inférieure. Ce filet se termine par des cordons qui descendent tout autour, et qui, au-dessous du ballon, se réunissent en une seule corde, celle où se placent les aérostats.

Si le ballon était complètement rempli de gaz à la pression atmosphérique, au moment où il s'élève, et que ce gaz ne pût en

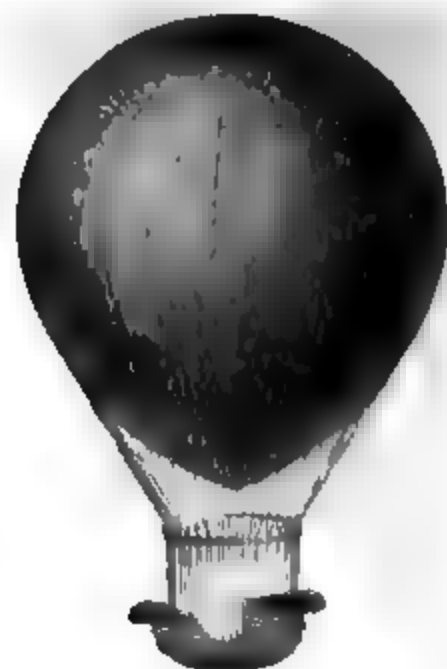


Fig. 359.

aucun moyen, il pourrait en résulter de très graves accidents. En effet, mesure que le ballon s'élève, il se place dans des couches d'air où la pression de l'air est de plus en plus faible. Or, comme le ballon supporte extérieurement de la part de l'air une pression qui diminue donc progressivement, tandis que la pression intérieure, par la force élastique du gaz qui y serait renfermé, ne varie pas d'intensité. L'enveloppe, qui était d'abord également soumise sur ses deux faces, se trouverait donc alors soumise, de part et d'autre, à des pressions très différentes; cela pourrait déterminer la rupture de cette enveloppe, ce qui permettrait au gaz de sortir, et par suite obligerait bientôt le ballon à retomber.

pour obvier à ces graves inconvénients, on peut employer deux moyens différents. Le premier consiste à ne pas emplir complètement le ballon au moment du départ. Lorsqu'il s'élève, et que la pression supportée extérieurement diminue, le gaz qu'il contient se dilate, le ballon se gonfle peu à peu : il est clair que, tant qu'il n'a pas pris tout le volume qu'il est susceptible de prendre, il n'y a pas à craindre de déchirure occasionnée par un excès de pression intérieure. Le second moyen, qui est presque exclusivement adopté maintenant, consiste à laisser une libre issue au gaz à la partie inférieure du ballon : de telle manière que, le gaz communiquant constamment avec l'air extérieur par cette issue, on ne doit pas avoir à craindre que la pression intérieure surpasse notablement celle du dehors. Autre, dans l'un et l'autre cas, on a toujours soin de pratiquer, au bas du ballon, une ouverture assez large, fermée par une soupape. Cette soupape, qu'un ressort maintient bien en contact avec les bords de l'ouverture, peut être ouverte à l'aide d'une corde qui est attachée et qui descend jusqu'à la portée des voyageurs. On craint que la pression intérieure ne surpasse trop la pression extérieure, soit que le ballon n'ait pas d'ouverture vers le bas, soit que cette ouverture se trouve accidentellement insuffisante pour laisser sortir une quantité convenable de gaz, on ouvre la soupape, jusqu'à ce qu'il se soit établi un équilibre de pression qui enlève toute chance d'accident.

La force ascensionnelle d'un ballon entièrement gonflé diminue mesure qu'il se trouve plus élevé dans l'atmosphère ; car l'air qu'il déplace a une densité de plus en plus faible, et le poids de cet air est en conséquence de plus en plus petit. Il est vrai que, comme nous venons de le dire, une portion du gaz sort par l'ouverture qui est pratiquée au bas du ballon, ou bien par la soupape supérieure, et cela amène une diminution correspondante dans le poids total du ballon : mais cette perte de poids ne compense pas la diminution de la poussée du fluide environnant. Il arrive bientôt un moment où la force ascensionnelle est complètement annulée, et le ballon reste stationnaire dans la couche où il se trouve ; ou du moins il ne peut plus que dans le sens horizontal, emporté par le courant qui existe dans cette couche. Pour faire monter le ballon plus haut, on allège la nacelle, en jetant du lest, c'est-à-dire du sable fin, dont on a soin de se munir en quantité convenable. Pour le faire descendre, au contraire, on ouvre la soupape pendant quelque temps, le gaz sort, le ballon se dégonfle ; et la poussée de l'atmosphère, qui est devenue plus que ne fait le poids du ballon, en raison de la perte de gaz, devient insuffisante pour le soutenir à la même hauteur.

414 PRINCIPES RELATIFS AU MOUVEMENT DES FLUIDES.

§ 284. Il est aisé de calculer la force ascensionnelle d'un ballon d'après ses dimensions, son poids, et la nature du gaz dont on le remplit. Le poids d'un mètre cube d'hydrogène, à la température de 0° , et sous la pression de $0^{\text{m}},76$ de mercure, est de 89^{r} ; le poids du même volume d'air, dans les mêmes circonstances, est de 129^{r} . La force ascensionnelle d'un mètre cube d'hydrogène, placé au lieu de l'air atmosphérique, est donc de 4240^{r} . Pour trouver la force ascensionnelle d'un ballon gonflé avec l'hydrogène, on doit donc multiplier 4240^{r} par le nombre de mètres cubes de gaz qui aura employés, et retrancher du produit le poids du ballon, du fil même, avec le filèt et la nacelle: on jugera ainsi de la grandeur du poids dont la nacelle pourra être chargée, sans que le ballon cesse de pouvoir s'élever.

Si l'on remplit le ballon de gaz hydrogène carboné servant à l'éclairage, comme on le pratique habituellement, à cause de la plus grande facilité de se procurer ce gaz, on ne pourra charger la nacelle que d'un poids beaucoup plus faible. La densité de ce gaz pris dans le gazomètre, est très variable, parce que sa composition n'est pas toujours la même; mais on peut la regarder en moyenne comme étant les $0,53$ de celle de l'air. Un mètre cube de gaz d'éclairage, dans les mêmes circonstances de température et de pression que ci-dessus, pèse donc environ 688^{r} ; et la force ascensionnelle dont il est animé, lorsqu'il est placé au milieu de l'air atmosphérique, est d'environ 644^{r} . En multipliant cette force par le nombre de mètres cubes de gaz employés, et retranchant du produit le poids du ballon, du filèt, et de la nacelle, on aura encore la mesure du poids que le ballon peut enlever. On voit que la force ascensionnelle d'un mètre cube de gaz d'éclairage est à peu près la moitié de celle d'un même volume d'hydrogène.

PRINCIPES RELATIFS AU MOUVEMENT DES FLUIDES.

§ 285. **Écoulement d'un liquide par un orifice.** — Lorsqu'un liquide est en équilibre dans un vase, et qu'on vient à pratiquer une ouverture dans la paroi du vase, au-dessous de la surface libre du liquide, l'équilibre est troublé. La portion de paroi qui a été enlevée, pour produire l'ouverture était plus pressée à l'intérieur qu'à l'extérieur, en raison de sa distance verticale à la surface libre du liquide: elle résistait à cette pression, et maintenait ainsi le liquide dans l'immobilité: mais aussitôt qu'elle est enlevée, le liquide, qui n'est plus retenu par rien, se précipite par l'orifice qui lui est offert.

Au moment où l'écoulement commence, les molécules liquides

ent immobiles un instant auparavant, ne traversent l'orifice avec une très petite vitesse; cette vitesse d'écoulement augmente vivement, et finit au bout de très peu de temps par atteindre une valeur qu'elle ne dépasse plus. Alors l'écoulement devient régulier; les molécules liquides qui sont à l'intérieur du vase sont en mouvement pour se rapprocher de l'orifice; chacune d'elles suit un chemin particulier, et prend généralement une vitesse de plus en plus grande, jusqu'à ce qu'elle soit arrivée à l'orifice. Si l'on observe les diverses molécules liquides qui marchent à la suite les unes des autres, en suivant le même chemin, ces molécules constituent ce que l'on nomme un *filet liquide*.

La théorie indique que la vitesse avec laquelle le liquide traverse l'orifice, lorsque le mouvement est devenu régulier, ne dépend pas de la direction de la portion de paroi dans laquelle cet orifice a été percé. Que l'écoulement se produise de haut en bas, *fig. 360*, ou de bas en haut, *fig. 361*, ou latéralement, *fig. 362*, la vitesse de cet écoulement doit être la même.

La théorie fait voir de plus que cette vitesse est égale à celle qu'acquiert un corps pesant, en tombant librement d'une hauteur égale à la distance verticale AB entre la surface libre du liquide au-dessus de l'orifice et l'orifice.

En sorte que, si l'on désigne par h cette hauteur AB exprimée en mètres, et par v la vitesse d'écoulement, on aura § 87

$$v = \sqrt{2gh}.$$

La formule donnera la vitesse en mètres :

c'est-à-dire qu'elle fera connaître le nombre de mètres que parcourrait chaque molécule li-

quide en une seconde, si elle continuait à se mouvoir avec la même vitesse pendant ce temps, à partir du moment où elle a traversé l'orifice. Nous avons donné précédemment (§ 88) les résultats numériques qui se déduisent de la formule, pour un grand nombre de valeurs de la hauteur h .

86. On peut vérifier par l'expérience que la vitesse d'écoulement d'un liquide est bien celle que la théorie indique. Lorsque l'écoulement a lieu de bas en haut, comme dans la *fig. 361*, on observe que le jet liquide qui se produit au-dessus de l'orifice s'élève à peu près jusqu'au niveau du liquide dans le vase. Il ne faut pas être ainsi qu'autant que les molécules qui traversent l'orifice sont lancées avec une vitesse égale à celle qui

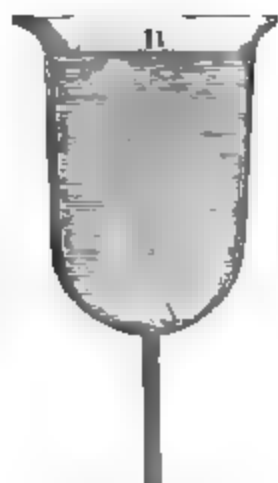


Fig. 360.

est due à la hauteur du niveau du liquide au-dessus de l'orifice. Pour que l'expérience se fasse d'une manière plus convenable, on se sert d'un vase de la forme suivante.

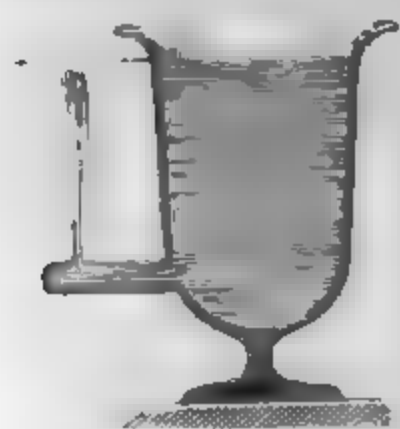


Fig. 361.

Le jet liquide sort par l'orifice avec une vitesse qui est en vertu de sa hauteur (§ 406); mais cet inconvénient sera plus que compensé par le fait de faire décrire une parabole à chaque molécule, ainsi qu'en retombant elle ne vienne arrêter les molécules suivantes.

Lorsque l'écoulement a lieu latéralement, par un orifice dans une paroi verticale, fig. 362, le jet liquide forme une parabole.

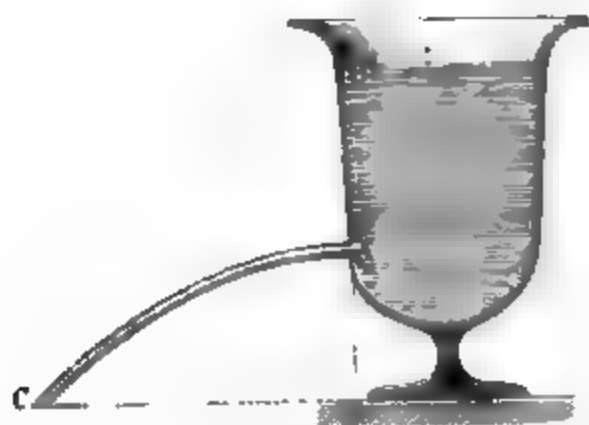


Fig. 362.

Le jet liquide forme une parabole, à la verticale qui passe par l'orifice, et le niveau AD de l'orifice et du point C. Le temps que met une molécule liquide, pour aller de A en C, est précisément le même que celui qu'elle emploierait à tomber verticalement de A en D (§ 404). Si AD est égal à $\frac{1}{2}g$, ou à 4^m,9, ce temps sera de $\frac{1}{2}$ seconde; il sera de $\frac{1}{3}$ seconde, $\frac{1}{4}$ de seconde, $\frac{1}{5}$ de seconde, etc.

est égal à $\frac{1}{4}$, ou $\frac{1}{9}$, ou $\frac{1}{16}$,....., de $4^m,9$. Admettons, pour les idées, que l'on ait choisi le point C sur le jet parabolique manière que AD soit égal à $\frac{1}{9}$ de $4^m,9$, c'est-à-dire égal à $\frac{1}{3}$: une molécule liquide aura mis $\frac{1}{3}$ de seconde pour aller de A à C. Mais si la pesanteur n'avait pas agi sur elle depuis le moment où elle est sortie de l'orifice, elle se serait mue horizontalement, avec un mouvement uniforme, et aurait ainsi parcouru une distance AC en $\frac{1}{3}$ de seconde (§ 104) : donc la vitesse avec laquelle le liquide sort du vase est égale à 3 fois la longueur CD. En déterminant par ce moyen la vitesse d'écoulement d'un liquide, pour diverses hauteurs du niveau supérieur au-dessus de l'orifice, on trouve que la vitesse est bien à très peu près égale à celle que donnerait la formule $v = \sqrt{2gh}$, dans ces différents cas.

87. La quantité de liquide qui traverse l'orifice pendant une seconde, ou ce que l'on nomme la *dépense*, dépend à la fois de la surface de l'orifice, et de la vitesse d'écoulement. Si le liquide, à sa sortie du vase, était soustrait à l'action de la pesanteur, et se mouvait qu'en vertu de sa vitesse acquise, la quantité de ce liquide qui sort pendant une seconde formerait un cylindre ayant pour hauteur la vitesse d'écoulement. En regardant l'orifice comme la base de ce cylindre, on voit qu'on aurait la dépense en multipliant l'aire de cet orifice par la vitesse d'écoulement. Or il est évident que la dépense ainsi obtenue convient aussi bien au cas où le liquide continue à être soumis à l'action de la pesanteur, après avoir traversé l'orifice : car les conditions de l'écoulement ne doivent pas être modifiées par les circonstances diverses dans lesquelles peut se trouver le liquide, après qu'il a quitté le vase. Si, par exemple, l'aire de l'orifice est de 2 centimètres carrés, et qu'il se trouve à $0^m,50$ au-dessous du niveau dans le vase, la dépense devra être égale à 4 centimètres cubes ($2 \times 343,2$) ; car la vitesse due à une hauteur de $0^m,50$ est de $3^m,432$ ou bien 343,2 centimètres (§ 88).

L'orifice d'écoulement a été pratiqué dans une paroi mince, la quantité de liquide qui s'écoule réellement en une seconde est de beaucoup inférieure à celle que l'on trouve par le moyen qui vient d'être indiqué ; la *dépense effective* n'est guère que les 0,62 de la *dépense théorique*, c'est-à-dire de la dépense obtenue en multipliant la surface de l'orifice par la vitesse d'écoulement. Voyons à quoi doit être attribuée cette différence considérable.

Nous avons dit que, si le liquide était soustrait à l'action de la pesanteur, après sa sortie du vase, la quantité de ce liquide qui sort pendant une seconde formerait un cylindre ayant pour hauteur la vitesse d'écoulement ; puis nous avons évalué le volume de ce cy-

lindre, en regardant sa base comme étant égale à l'orifice. C'est ce dernier point que nous avons commis une erreur : la base de notre cylindre liquide est très notablement plus petite que ce que nous l'avons supposé. Les différents filets liquides, à l'intérieur du cylindre, convergent vers l'orifice d'écoulement ; leur convergence ne se fait pas brusquement au moment où ils l'atteignent : elle se fait encore jusqu'à une certaine distance au delà. Il en résulte que la veine fluide ne présente pas, à son origine, la figure d'un cylindre ; elle se contracte d'abord, puis bientôt devient sensiblement cylindrique. Ce que nous devons prendre pour la base du cylindre, nous avons parlé plus haut, ce n'est donc pas l'aire de l'orifice, mais l'aire de la section contractée de la veine fluide. On conçoit aisément comment il se fait que la dépense effective soit si différente de la dépense théorique, telle que nous l'avons trouvée. Cependant, malgré l'erreur que nous avons commise dans notre raisonnement, pour arriver à trouver la quantité de liquide qui s'écoule dans une seconde, nous conserverons, suivant l'usage, le nom de *dépense théorique* au produit de l'aire de l'orifice par la vitesse d'écoulement du liquide.

Des mesures prises sur différentes veines fluides, sortant d'orifices circulaires percés en minces parois, ont fait reconnaître qu'on peut adopter en moyenne les résultats suivants. Si le diamètre de l'orifice, fig. 363, est divisé en 40 parties égales, le diamètre



Fig. 363.

de la section contractée contiendra 8 de ces parties, et la distance e de cette section à l'orifice en contiendra 5. L'aire de la section contractée est donc moyennement les $\frac{64}{40}$ de l'aire de l'orifice ; et si l'on multiplie cette aire par la vitesse de l'écoulement, on trouvera un résultat qui sera sensiblement le même

que celui qui est fourni par la mesure directe de la quantité de liquide écoulée.

§ 288. A partir de la section contractée, la veine liquide prend des formes diverses, suivant la direction dans laquelle se fait l'écoulement ; considérons spécialement une veine verticale, correspondant à un orifice pratiqué à la partie inférieure d'un vase. Nous avons dit que la veine liquide, après s'être contractée d'une

ble, jusqu'à une petite distance de l'orifice; il devient ensuite sensiblement cylindrique. En réalité cela n'arrive pas exactement; la veine dont nous nous occupons a des sections transversales de cette forme conique toujours, à mesure qu'elles s'éloignent plus loin de l'orifice; la veine liquide se contracte toujours, jusqu'au moment où elle se brise en gouttes. Mais cette contraction existe dans toute la longueur de la veine, due à une tout autre cause que celle qui se produit tout près de l'orifice: elle est beaucoup moins sensible que cette dernière à l'origine initiale, et à l'inspection de la veine on distingue très bien le point où finit la première et commence l'autre.

Pour rendre compte de la manière dont la veine se modifie d'un point à l'autre, imaginons que des molécules sortent successivement de l'orifice avec des vitesses égales, et qu'elles se séparent à des intervalles de temps égaux, d'un dixième de seconde, par exemple. Ces molécules descendront toutes dans la même verticale, et la distance de séparation entre elles ira constamment en augmentant, puisque leurs vitesses augmentent. Aucune d'elles emploiera toujours le même temps, un dixième de seconde, pour occuper la place qu'occupe la suivante. Au cours du mouvement du liquide, les quantités qui sortent de l'orifice, pendant chaque dixième de seconde, sont égales entre elles; si les quantités d'eau se séparaient, de manière à former des gouttes isolées, elles deviendraient en s'éloignant progressivement les unes des autres, comme le faisaient les molécules dont nous venons de parler. Les masses d'eau qui sortent ainsi successivement de l'orifice, pendant chaque dixième de seconde, ne se quittent pas; elles restent adhérentes les unes aux autres, de ma-

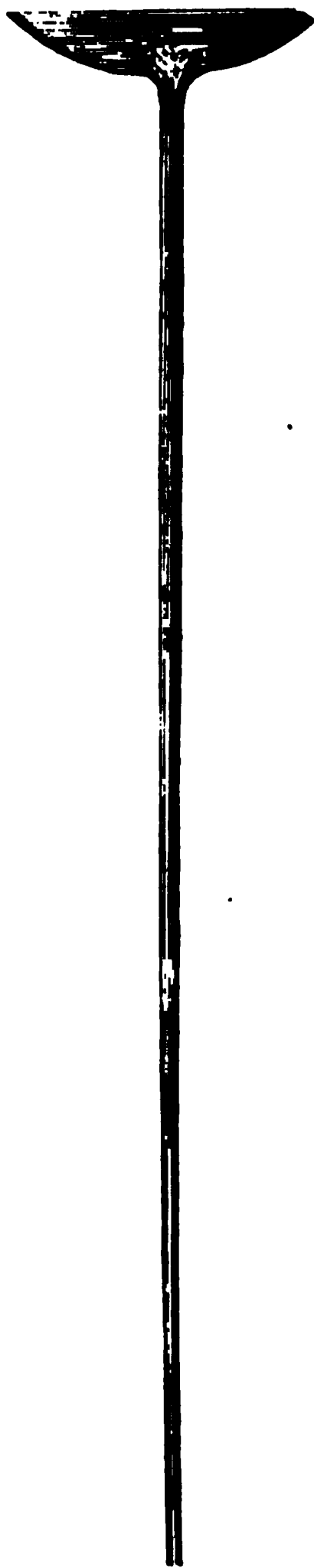


Fig. 634.



Fig. 365.

nière à former une veine continue, leurs distances mutuelles iraient tant progressivement, si elles ne peuvent rester adhérentes qu'autant qu'elles s'allongent à mesure qu'elles descendent, le fluide qui éprouve nécessairement une portion de la veine fluide, en l'orifice, entraîne une diminution dans sa section transversale qui donne lieu au rétrécissement de la veine fluide dont nous avons parlé à partir de la section à laquelle nous avons donné le nom de section contractée. 364 peut donner une idée de cette veine fluide.

S'il n'existait pas de cause qui vissent modifier la forme de la veine fluide verticale, telle que nous la trouvons, cette veine s'allongerait en s'effilant de plus en plus, et à une grande distance de l'orifice elle se diviserait en gouttes. Mais habituellement, sur la surface de la veine, se produisent des ondes pareilles à celles qu'on voit sur la surface d'une eau tranquille, si on y a laissé tomber une pierre. Ces ondes produisent des renflements et des rétrécissements successifs de la veine, des mouvements vibratoires des molécules, qui déterminent ces renflements et rétrécissements, les font d'ailleurs mieux ressortir, que la veine lui-même ne le fait, et bientôt il arrive qu'elle se sépare et forme des gouttes. En évitant autant que possible les vibrations des molécules liquides, on peut former une veine qui reste continue de toute longueur, en produisant au contraire des vibrations dans l'air qui environne la veine, à l'aide d'un instrument

exemple, on voit la veine se raccourcir beaucoup, et se diviser en gouttes à peu de distance de l'orifice d'écoulement.

Les considérations analogues à celles qui viennent d'être développées pour les veines verticales descendantes peuvent être appliquées aux veines verticales ascendantes. On reconnaît ainsi une pareille veine fluide, après s'être contractée à la sortie de l'orifice, en raison de la convergence des filets liquides qui la forment, se dilate ensuite peu à peu, à cause de la diminution de la résistance qu'éprouvent successivement les molécules liquides, à mesure qu'elles s'élèvent. Quant aux vibrations dont nous avons parlé, qui ont une grande influence sur une veine descendante pour la faire écouler en gouttes, elles ne produisent que peu d'effet sur une veine ascendante : parce que sa section transversale, augmentant au lieu de diminuer à mesure qu'elle s'éloigne de la section contractée, est jamais assez petite pour que l'effet de ces vibrations devienne sensible.

§ 239. Ce que nous avons dit, relativement à la vitesse d'écoulement d'un liquide par un orifice, s'applique indistinctement au cas

l'écoulement aurait lieu dans le vide, et au cas où il se produirait dans l'atmosphère; la vitesse d'écoulement sera toujours la même, quelle que soit la pression exercée sur la surface libre du liquide dans le vase, pourvu que la veine liquide, à sa sortie de l'orifice, soit soumise extérieurement à la même pression. Mais la vitesse sera très différente de celle que nous avons indiquée, si les pressions ne sont pas égales sur la surface libre du liquide et à l'orifice.

Si la pression est plus grande à l'orifice A que sur la surface BC du liquide, *fig. 366*, l'excès de la première pression sur la seconde sera être inférieur à la pression que produirait une colonne de liquide qui aurait pour hauteur la distance verticale de l'orifice à la surface BC; sans cela le liquide ne pourrait pas couler par cet orifice. Menons donc dans le vase un plan horizontal DE, situé au-dessous du plan BC, à une telle distance de ce plan, que le poids d'une colonne de liquide, comprise entre ces deux plans, et ayant pour base l'unité de surface, soit égal à l'excès de pression dont il s'agit.

Le liquide n'étant animé que d'un mouvement très lent dans le vase, en raison de la petite vitesse que nous supposons toujours à



Fig. 366.



soumis à des pressions égales. Ainsi la vitesse d'écoulement est bien encore représentée par la formule $\sqrt{2gh}$, où h prend pour h la hauteur du plan DE au-dessus de l'orifice.

Si la pression est plus faible sur l'orifice A, que sur la surface libre BC, on peut concevoir que l'excès de pression sur la surface BC soit produit par un liquide de même nature que celui qui est dans le vase, disposé au-dessus de cette surface, et qui a une surface libre D'E', située à une hauteur convenable. On voit alors que se produit donc de la même manière que si le liquide, au lieu d'être en BC, et de supporter la pression que l'orifice, était en D'E', et supportait la pression que l'orifice. La formule $\sqrt{2gh}$ donnera donc encore la vitesse d'écoulement du liquide, pourvu que h désigne la distance de l'orifice au niveau idéal D'E'.

On voit, par ce qui précède, qu'une diminution ou une augmentation de pression sur la surface libre du liquide dans le vase, entraîne une augmentation ou une diminution dans la vitesse d'écoulement du liquide. Au contraire, une diminution ou une augmentation de la pression sur l'orifice, sans changement de pression sur la surface libre, détermine une augmentation ou une diminution correspondante de la vitesse d'écoulement.

ous maintenant d'étudier les modifications que subit l'écoulement d'un liquide par un orifice, en raison des dimensions de l'ajutage dont cet orifice est muni. L'ajutage adapté à l'orifice est cylindrique, *fig. 367*, voir lieu de deux manières

1. La veine liquide traversant l'ajutage sans en toucher les parois : elle se contracte en mouillant seulement une petite surface étendue. Dans le premier cas, les filets se passent exactement de l'orifice à l'ajutage. L'orifice était percé en mince, la veine se contracte d'abord, puis elle se dilate et devient cylindrique : elle ne remplit pas toute la capacité intérieure de l'ajutage.



Fig. 367.

2. On pourrait enlever sans modifier l'écoulement l'ajutage. Dans le second cas, qui se produit habituellement, le liquide a une forme toute différente de celle qu'elle prendrait si l'ajutage n'était pas là. L'adhérence du liquide avec les parois de l'ajutage empêche le liquide d'emplir toute la capacité intérieure de l'ajutage : il se contracte, comme elle ferait si l'orifice était percé en mince paroi, prend donc immédiatement la forme d'un jet pour base l'orifice d'écoulement lui-même.

Le liquide qui s'écoule pendant une seconde, par un orifice dont le liquide mouille les parois, on trouve que la dépense est augmentée considérablement par l'effet de l'ajutage. On trouve environ les 0,82 de la dépense théorique (§ 287) : l'écoulement avait eu lieu par un orifice percé en mince, on n'en aurait été que les 0,62. On conçoit aisément que la dépense est augmentée.

Nous avons vu que, si l'écoulement avait eu lieu par un orifice percé en mince, la dépense n'en aurait été que les 0,62. On conçoit aisément que la dépense est augmentée.

Nous avons vu que, si l'écoulement a lieu par un orifice percé en mince, la dépense n'en aurait été que les 0,62. On conçoit aisément que la dépense est augmentée. Nous avons vu que, si l'écoulement a lieu par un orifice percé en mince, la dépense n'en aurait été que les 0,62. On conçoit aisément que la dépense est augmentée.

On se demande pourquoi la dépense effective, dans le cas d'un ajutage cylindrique, n'est pas égale à la dépense théorique. Elle n'en est que les 0,82. Cela tient à ce que l'ajutage ne remplit pas toute la section transversale de la veine.

paroi, parce que l'on doit prendre pour base du c la section contractée de la veine, et non pas l'orifice cylindrique ramène la base du cylindre liquide à l'orifice d'écoulement; mais en même temps il diminue l'écoulement du cylindre. Cependant la hauteur du cylindre liquide nuée dans le rapport dans lequel sa base est augmentée résulte une augmentation réelle de dépense.

Il nous reste maintenant à indiquer la cause de la perte cylindrique apportée dans la vitesse d'écoulement. Nous avons dit que la contraction de la veine liquide d'un orifice percé en mince paroi, était due à la cohésion des filets liquides, au moment où ils se présentent à l'orifice, qu'ils ne perdent complètement qu'à une certaine distance.

L'ajutage cylindrique, en s'opposant à la contraction, oblige les filets liquides à changer brusquement de direction sitôt qu'ils traversent l'orifice. Ces filets sont donc soumis aux mêmes conditions que s'ils éprouvaient un choc. qui est produit de manière à produire ce changement brusque de direction. Or nous avons vu que les chocs donnent généralement de grandes pertes de travail (§ 113). Les molécules liquides, lorsqu'elles viennent de pénétrer dans l'ajutage, ne doivent donc avoir toute la vitesse qu'elles auraient eue sans cette cir-

la pression atmosphérique. C'est ce qu'on reconnaît en plaçant à l'ajutage un tube de verre C, qui se recourbe, et qui, dans un vase contenant du mercure: pendant on voit le mercure monter et s'y maintenir à une certaine hauteur au-dessus du niveau extérieur du liquide dans l'ajutage ou à une sorte de succion inverse, qui fait monter le tube C, comme si l'on tirait à l'extrémité supérieure de ce



Fig. 368.

détails dans lesquels nous ne nous arrêtons pas, sur l'effet produit par la forme conique, vont nous aider à comprendre ce qui se passe, quand un liquide s'écoule par des ajutages de di-

amètre conique convergent, *fig. 369*, a une influence plus grande sur l'écoulement du liquide, suivant que, pour un même diamètre, il y a une différence plus grande entre les diamètres de ses extrémités. On a cherché par l'expérience quel devait avoir un pareil ajutage, pour avoir une égalité d'orifice de sortie AB, la plus grande possible. On a trouvé que les deux arêtes opposées de l'ajutage devaient être inclinées l'une sur l'autre sous un angle de 13 à 14 degrés; c'est la donnée que la *fig. 369* représente.



Fig. 369.

En employant un pareil ajutage, on obtient une dépense effective qui est les 0,95 de la dépense correspondant à l'orifice de sortie AB. On se rend aisément de ce résultat, en observant que, d'une part, le liquide ne doit se contracter que d'une petite quantité à l'orifice AB, puisque les filets liquides ne sont pas convergents; et que, d'une autre part, la perte de vitesse du liquide doit éprouver, en raison de ce que les filets changent de direction à leur entrée dans l'ajutage, est beaucoup moins grande que dans le cas d'un ajutage cylindrique, où le changement de direction de ces filets est moins pro-

Si l'on adapte un ajutage conique divergent à un orifice *Fig. 370*, et que le liquide le traverse en mouillant ses parois, la dépense obtenue peut être plus grande que la dépense théorique correspondant à cet orifice. Ce résultat peut s'expliquer de la manière suivante. A mesure que le liquide traverse l'intérieur de l'ajutage, il traverse des sections de plus en plus grandes; il s'étale progressivement, jusqu'à remplir l'ajutage en totalité; et par suite sa vitesse doit diminuer, à mesure qu'il s'approche de son extrémité. Cette diminution doit être produite par une force en sens contraire du mouvement. Or cette force peut provenir de deux pressions que le liquide supporte : la pression atmosphérique qui agit sur le liquide contenu dans le vase, et la pression que le liquide contenu dans l'ajutage, pour modifier sa vitesse, si cet ajutage a son axe courbé. Le liquide est soumis à la pression atmosphérique à sa sortie de l'ajutage; il éprouve d'ailleurs une pression contraire, de la part du liquide qui sort du vase et qui agit sur la section *AB*: donc il faut que la première pression sur la seconde, d'une quantité assez grande pour produire l'augmentation de la vitesse du liquide qui a lieu dans toute la longueur de l'ajutage. Ainsi le liquide, en s'écoulant par l'orifice, éprouve, à son passage par cet orifice, une pression plus grande que la pression atmosphérique, qui s'exerce sur la surface intérieure du vase: cette différence des pressions, sur la surface intérieure du vase, doit faire prendre au liquide une vitesse plus grande que celle qu'il prendrait si les pressions étaient égales (§ 289). Il y a bien une perte de vitesse, due au brusque changement de direction des filets liquides, au moment où ils sortent de l'ajutage; mais cette perte est plus que compensée par l'augmentation qu'éprouve la vitesse, en raison de la diminution qui a lieu à l'entrée de l'ajutage.

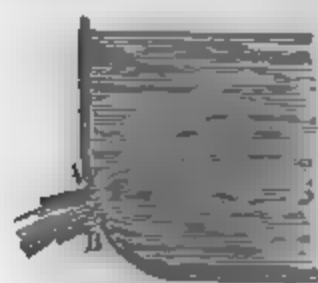


Fig. 370.

Il est à peine nécessaire d'ajouter que, si la dépense produite par un ajutage conique divergent est plus grande que la dépense théorique correspondant à l'orifice d'entrée, elle est contraire beaucoup plus petite que celle qui correspond à l'orifice de sortie. La perte de vitesse, résultant de ce que les filets liquides éprouvent un changement brusque de direction à leur sortie de l'ajutage, se fait sentir ici: et la quantité de liquide qui sort de l'orifice de sortie de l'ajutage est moindre que si les filets

lice de sortie, sans éprouver de changement brusque
tion.

n'on veut utiliser la vitesse avec laquelle un liquide
a orifice, pour produire certains effets, pour faire
exemple, une roue hydraulique, il est important
les pertes de vitesse qui sont occasionnées par les
rusques de direction des filets liquides. Si l'on pou-
l'orifice dans une paroi sans épaisseur, ces pertes
pas. Mais la paroi

sairement une épais-
pour résister à la
à supporter, l'o-
ratiquera sera donc
es conditions qu'un
mince paroi, qu'on
l'un ajutage. Pour
de vitesse qui pour-
la passage du liquide
on en arrondit les
érieur du réservoir,
te manière, les filets

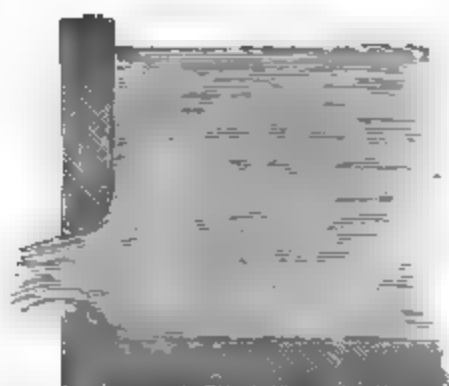


Fig. 371.

igent que progressivement de direction, et ils sortent
ec toute la vitesse que peut déterminer la hauteur
essus de l'orifice. Dans ce cas on dit que l'orifice

mm. — On donne le nom de *siphon* à un tube recourbé
2, à

peut
n li-
se M,
ase N
sans
rtuto
is du
c les-
de est
com-
mplir
tube
is on

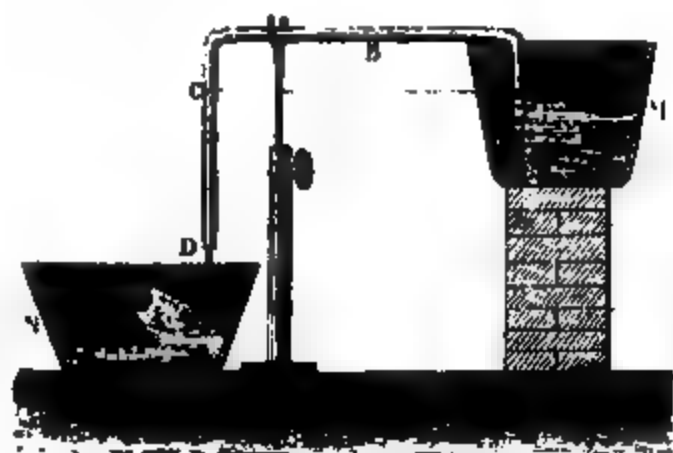


Fig. 372.

re l'indique la figure. On voit alors le liquide s'é-
émité D du siphon : le vase M se vide de plus en



plonge dans le vase, et au niveau de cette surface égale à la pression atmosphérique. Si l'on s'élève partir de là, jusque dans la partie supérieure B, pressions de plus en plus faibles, en raison de la se sera élevé : la pression en B, par exemple, sera pression atmosphérique diminuée du poids d'une colonne dont il s'agit, ayant pour base l'unité de surface, et distance verticale du point B au-dessus de la surface dans le vase M. Si ensuite on continue à marcher en descendant le long de la seconde branche, on ti sions de plus en plus grandes ; arrivé en C, au niveau libre du liquide dans le vase M, on retrouvera une la pression atmosphérique. Si l'on continue à descendre sions qu'on rencontrera augmenteront encore : et D, on trouvera que la pression supportée par le petit piston qui ferme l'extrémité du tube est égale à la pression atmosphérique augmentée du poids d'une colonne pour base l'unité de surface et pour hauteur la distance du point D au-dessous du point C, ou, ce qui est la même chose, la distance du point D au-dessous du niveau du liquide dans le vase M. Le piston supporte inférieurement la pression atmosphérique et est pressé de haut en bas que de bas en haut, et il s

quide contre les parois intérieures du siphon, comme nous le verrons bientôt.

Pour que le siphon puisse fonctionner, il est nécessaire que l'on le mette dans l'atmosphère. Sans la pression atmosphérique, qui s'exerce sur le liquide en M, ce liquide ne monterait pas de A en B. Si l'on met le siphon dans le vide, le liquide qu'en aurait introduit d'abord dans la longueur du siphon, pour l'amorcer, se diviserait en deux parties au point le plus élevé du tube; une portion descendrait par la branche de gauche, et l'autre par la branche de droite. On comparera de la même manière, que si le siphon présentait de trop grandes dimensions, dans le sens vertical, il ne fonctionnerait pas, qu'il fût placé dans l'atmosphère, car on sait que la pression atmosphérique ne peut pas déterminer l'ascension d'un liquide à une hauteur plus grande que celle d'une colonne de ce liquide qui serait en équilibre (§ 253).

Pour qu'un siphon puisse être facilement amorcé, on lui adapte un tube latéral, qui s'embranché sur lui tout près de l'extrémité D, et qui remonte verticalement, à côté de la branche CD. Lorsque le siphon est installé dans la position qu'il doit occuper pendant l'écoulement du liquide, sans avoir été préalablement amorcé, on ferme l'extrémité D à l'aide d'un bouchon, puis on aspire par l'extrémité inférieure du tube latéral dont on vient de parler. Cette aspiration produisant une diminution de pression de l'air qui est contenu à l'intérieur du siphon et qui ne communique pas au dehors, il en résulte que le liquide du vase M monte de A en B, et redescend ensuite de B en D. Le siphon est alors amorcé: et il suffit d'ôter le bouchon qu'on avait mis en D, pour que l'écoulement ait lieu. C'est ainsi qu'on opère souvent pour vider un tonneau plein de vin, sans avoir besoin de percer un trou dans un des fonds: le siphon dont on se sert dans ce cas, est de fer-blanc, et est construit de manière à laisser facilement passer par la bonde, en laissant encore tout autour de lui un libre passage pour l'air qui doit remplir le tonneau à mesure que le vin en sort.

291. Écoulements constants. — Pour que la vitesse avec laquelle un liquide s'écoule par un orifice reste constamment la même, il faut que la charge sur cet orifice ne varie pas, c'est-à-dire que la surface libre du liquide, dans le réservoir d'où il s'écoule, reste toujours à une même hauteur au-dessus de l'orifice. Nous avons vu (§ 58) un moyen qu'on peut employer pour atteindre ce but. Un de ces moyens, dont on pourra se servir lorsqu'on aura à opérer sur de grandes quantités de liquide beaucoup plus considérables, consiste à faire arriver une source de liquide dans le réservoir, et à pratiquer

430 PRINCIPES RELATIFS AU MOUVEMENT DES FLUIDES

dans sa paroi une échancrure latérale correspondant à un niveau constant qu'on veut que le liquide y prenne, si la source qui alimente le réservoir fournit plus de liquide qu'il ne doit s'écouler par l'orifice, l'excédant sortira par cette échancrure, et le niveau restera constant. Ce dernier moyen est souvent employé pour régulariser la vitesse d'écoulement de l'eau qui est destinée à mouvoir les roues hydrauliques.

§ 295. **Écoulements intermittents.** — La fontaine intermittente, représentée ici, fig. 373, est un appareil disposé de manière à produire un écoulement intermittent.



Fig. 373.

par les orifices B, B, et tombe dans la cuvette E. Cette cuvette est percée d'un trou O, par lequel l'eau s'écoule dans une autre cuvette placée au-dessous de la première. Mais l'orifice O ne laisse pas sortir autant d'eau qu'il en arrive dans la cuvette E, en sorte que le niveau du liquide s'y élève, et vient à fermer l'extrémité inférieure D du tube, qui permettrait à la pression atmosphérique de s'exercer sur l'eau du vase A. L'écoulement par les orifices B, B, ne s'effectue plus sous les mêmes conditions. La pression exercée par l'air qui

se trouve au-dessus de l'eau dans le vase A, tend à pousser le liquide vers le haut, et à le faire sortir par les orifices B, B. Ce vase est communiquant avec l'atmosphère par le tube supérieur, et il est traversé par un tube vertical qui est ouvert à ses deux bouts, et qui communique le vase A avec l'atmosphère. A l'écoulement de cette eau, la pression atmosphérique s'exerce librement sur l'eau contenue dans le vase A ; celle-ci

Le niveau A diminue peu à peu, à mesure que l'eau continue à s'écouler. Puisque cet air, actuellement isolé de l'atmosphère, occupe un volume de plus en plus grand. La vitesse d'écoulement par les orifices B, B, doit donc diminuer progressivement; et bientôt l'eau cessera tout à fait, lorsque l'excès de la pression atmosphérique sur la pression que supporte l'eau dans le vase A sera capable de maintenir en équilibre la colonne d'eau située au-dessus des orifices B, B. La vitesse de chacun de ces orifices fait d'ailleurs que l'eau ne peut pas couler dans une partie de sa largeur, pendant que l'air s'écoulera par l'autre partie: l'écoulement cesse donc complètement. L'eau qui s'est accumulée dans la cuvette E en sort toujours par l'orifice O: et comme cette eau n'est plus renouvelée, son niveau baisse, ce qui fait que bientôt l'extrémité inférieure D du tube vertical va se trouver dégagée. Alors l'air atmosphérique commun se mettra de nouveau en communication avec l'intérieur du vase A, l'écoulement recommencera par les orifices B, B, et le niveau de l'eau remontera dans la cuvette E. La communication de l'atmosphère avec l'intérieur du vase A étant de nouveau interceptée, l'écoulement par les orifices B, B, s'arrêtera bientôt, et ainsi de suite. L'écoulement se produira d'une manière intermittente, tant que le vase A contiendra de l'eau.

296. Il existe dans diverses localités des fontaines naturelles qui nous fournissent de l'eau que d'une manière intermittente. Nous allons voir comment il est possible de se rendre compte de ce phénomène.

Imaginons qu'on ait disposé un vase, fig. 374, de telle façon que son fond soit traversé par un tube de verre recourbé en forme de siphon. Si l'on verse de l'eau dans ce vase, elle s'y maintiendra tant que la surface libre AB ne se sera pas élevée au-dessus de la partie supérieure C du siphon. L'air atmosphérique pénétrant librement par la partie inférieure de la grande branche du siphon, l'eau s'écoulera dans la petite branche, et s'y placera au même niveau que dans le vase. Mais dès que la surface libre de l'eau dans le vase s'élèvera au-dessus du point le plus élevé du siphon, l'eau qui s'est introduite à son extrémité supérieure coulera dans la grande branche; le siphon sera amorcé, et le vase se videra, jusqu'à ce que le niveau de l'eau se soit abaissé au-dessous de l'extrémité inférieure de la petite branche du siphon.

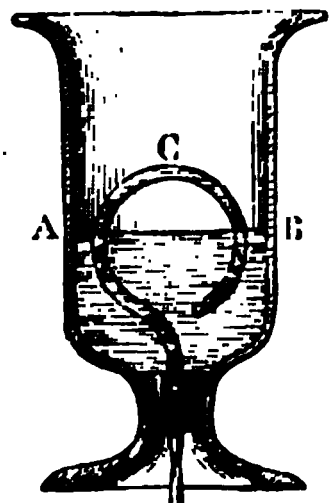


Fig. 374.

432 PRINCIPES RELATIFS AU MOUVEMENT DES FLUIDES

On peut encore disposer cet appareil autrement, fig. 375, plaçant le tube recourbé par un simple tube droit, ouvert



Fig. 375.

bouts, que l'on recouvre d'un autre large et fermé par le haut. L'ensemble des deux tubes constitue une sorte de siphon ; le tube intérieur est la grande branche et la petite branche est formée par l'espace compris entre la surface extérieure du premier tube et la surface intérieure du second. Si l'on verse de l'eau dans le vase, elle s'élèvera encore, tant que sa surface sera au-dessous de l'extrémité C du tube intérieur ; aussitôt que le niveau aura dépassé cette extrémité, l'eau qui remplit déjà le siphon commencera à s'écouler, et le vase se videra complètement.

Pour obtenir un écoulement intermittent, à l'aide de l'un des appareils dont il vient d'être question, il suffira de faire dans le vase un petit filet d'eau qui coule sans interruption. Le vase se remplira peu à peu ; la surface de l'eau AB s'y élèvera continuellement ; bientôt le siphon s'amorcera, et le vase se videra ; que le niveau de l'eau se sera ainsi suffisamment abaissé, le vase ne pourra plus fonctionner ; il se videra lui-même. Alors on remplira de nouveau, et l'écoulement par le siphon recommencera lorsque la surface de l'eau se sera élevée de nouveau jusqu'en C. Il est clair que, pour qu'on obtienne ainsi un écoulement intermittent, il faut que la quantité d'eau qui sort par le

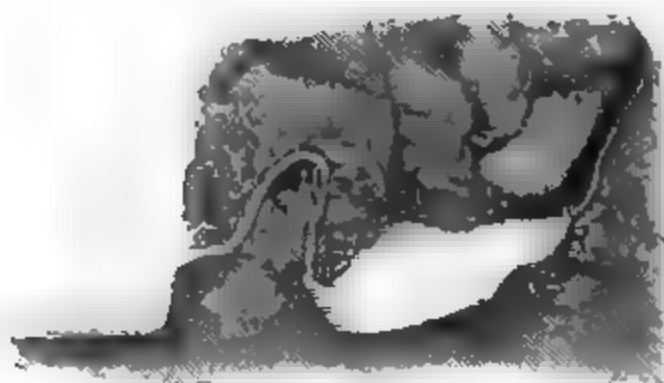


Fig. 376.

plus grand réservoir qui arrive au siphon, et qui tend à le remplir, sans que le siphon ne se vide, le vase ne pourrait fonctionner.

Les fontaines intermittentes peuvent être obtenues par une disposition particulière du terrain, au lieu de celle des appareils dont nous venons de parler. Concevons

un terrain qui présente une dépression, au fond de laquelle se trouve un réservoir d'eau. Si l'on creuse un puits dans le terrain, et que l'on y place un siphon, le siphon s'amorcera, et le réservoir se videra ; mais aussitôt que le niveau de l'eau se sera abaissé, le siphon se déamorcer

iste à l'intérieur de la terre, *fig. 376*, et qu'elle se rem-
 au peu à peu, soit par des infiltrations lentes, soit par un
 d'eau qui y est amené par une petite fissure du terrain.
 is de plus que cette cavité communique au dehors par un
 étroit, qui se relève d'abord, pour s'abaisser ensuite, de
 former une sorte de siphon. L'eau s'accumulera dans cette
 jusqu'à ce que son niveau se trouve à la hauteur du point le
 é de ce conduit. De nouvelles quantités d'eau arrivant, le
 amorcera, et l'eau s'écoulera au dehors. Bientôt le siphon
 et cessera de fonctionner, et la cavité intérieure se rem-
 nouveau, jusqu'à ce que le siphon s'amorce et recommence.
 Pour que le siphon puisse ainsi vider ce réservoir intérieur,
 essaire que la surface de l'eau y soit soumise à la pression
 érique (§ 293), et que l'air extérieur puisse y pénétrer faci-
 pendant que l'eau en sort ; cette condition se trouvera très
 nt remplie, en raison des fissures nombreuses qui existent
 ment dans les terrains, et dans lesquelles l'air atmosphé-
 répand librement. La disposition qui vient d'être indiquée
 pouvant donner lieu à une fontaine intermittente n'exige
 ncours d'un grand nombre de conditions spéciales ; on
 très bien qu'elle se soit présentée dans plusieurs localités,
 ul effet du hasard.

1. Fontaine de Héron. — Lorsqu'on fait sortir le liquide
 dans un vase par une ouverture disposée de manière à
 un jet vertical, comme dans la *fig. 364* (page 416), il ne
 jaillir plus haut que le plan horizontal correspondant à la
 libre du liquide dans le vase. Mais il n'en est plus de même
 ce liquide est divisé en deux portions, entre lesquelles est
 ée une masse gazeuse : le jet liquide peut s'élever, dans
 à une hauteur beaucoup plus grande que celle qui est déter-
 ar la surface libre dans le réservoir. C'est ce que l'on com-
 sans peine, à l'aide de l'appareil connu sous le nom de *fon-*
Héron (Héron, l'inventeur de cet appareil, vivait à Alexan-
 s l'an 420 avant J.-C.). Celui qui est représenté ici, *fig. 377*,
 ose d'un simple tube de verre recourbé, dont une extrémité
 git en entonnoir, et qui présente deux renflements B, C,
 onction de réservoirs. Si ce tube recourbé contenait seule-
 l'eau, et que le liquide s'élevât dans la branche de droite,
 dans l'entonnoir A, comme l'indique la figure, il devrait
 dans la branche de gauche à la même hauteur, car le tube
 erait, à proprement parler, un système de vases communi-
 Mais supposons que l'eau ne s'étende que de A en B ; qu'au-

dessus de la surface de l'eau dans la boule B, et jusque dans la boule C, il y ait une certaine quantité d'air : puis que le reste

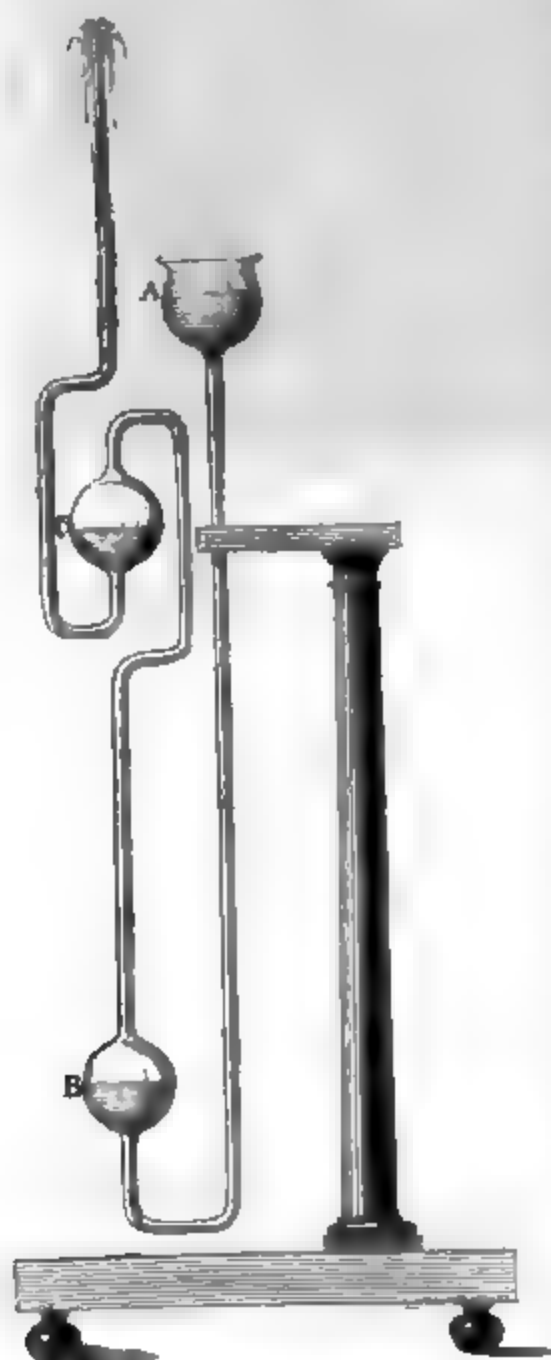


Fig. 377.

partir de cette boule A, on remplit d'eau la partie supérieure de cet air, entre les deux surfaces de l'eau, modifie le résultat. Le poids de l'eau, en B et en C, sur une partie des parois de la boule, est contenu, il est en vertu de sa force expansive, des pressions exercées sur divers points de ces faces, si toutefois on ne considère son poids, qui est très-négligeable. La pression est portée par la surface de la boule C dans la boule C, même que celle qui est portée par une colonne d'eau pesant directement sur la surface, et ayant une hauteur égale à la différence de niveau de l'eau en A et en C. On conclut de là que la pression qui part de la paroi de la boule C et agit verticalement, a une assez grande longueur pour maintenir en équilibre une hauteur, à un niveau en C, égale à la surface de l'eau au-dessus du niveau en A, que, de plus, si on a une longue tube pour que l'équilibre soit parfait, l'eau jaillira

à une hauteur qui approchera de celle qui conviendrait à l'équilibre, comme le montre la figure.

§ 298. Mouvement des liquides dans des tuyaux

de dans un tuyau, en le remplissant complètement, il n'existe pas des parois du tuyau une résistance qui diminue avec la distance. Pour se rendre compte de la manière dont se manifeste cette résistance, il faut observer que les molécules liquides qui touchent les parois développent ainsi un frottement qui ralentit leur mouvement; les molécules voisines des premières, se trouvant d'une vitesse plus grande qu'elles, donnent lieu à un développement d'un frottement qui tend à accélérer les premières molécules, et à ralentir celui des autres, et ainsi de suite. En sorte que, si l'écoulement du liquide est devenu uniforme, on peut concevoir que ce liquide soit formé de diverses couches qui s'enveloppent les unes les autres, en s'étendant le long de la longueur du tuyau, et qui se meuvent chacune avec une vitesse propre. La première couche, qui enveloppe toutes les autres, est celle dont la vitesse est la plus petite, la seconde est la plus vite; la troisième, plus vite encore, et enfin la plus intérieure, qui se réduit à un simple filet liquide, a la plus grande vitesse. Le glissement de chaque couche, à l'intérieur de celle qui l'enveloppe, détermine un frottement qui tend à diminuer la vitesse de la première et à accélérer celle de la seconde. Chaque couche est donc soumise à deux frottements, dont l'un, agissant sur sa surface extérieure, tend à ralentir son mouvement, et l'autre, agissant sur sa surface intérieure, tend à l'accélérer; mais le premier frottement l'emporte sur le second, et la couche se trouve en définitive soumise à un frottement qui tend à diminuer sa vitesse. C'est en raison de ces frottements, qui agissent sur les diverses couches, que la vitesse du liquide qui coule dans le tuyau est diminuée. On voit par ce que nous venons de voir, les vitesses des divers filets liquides qui traversent une même section transversale ne sont pas les mêmes, ces vitesses sont de plus en plus grandes, pour des molécules de plus en plus éloignées des parois, et la plus grande est celle qui est placée la plus près du centre de la section. La quantité de liquide qui traverse une section transversale dans l'espace d'une seconde, est la même pour ces vitesses différentes. Si l'écoulement se produisait de manière que toutes les molécules liquides aient une même vitesse, le liquide se mouvrait comme tout d'une pièce, et le volume du liquide qui traverse une section transversale dans une seconde, en multipliant la surface de cette section par la vitesse du liquide; ou bien encore, si l'on divisait le volume de liquide écoulé en une seconde, par la surface de la

436 PRINCIPES RELATIFS AU MOUVEMENT DES FLUIDES

section transversale du tuyau, on trouverait la vitesse du liquide. Dans la réalité, les vitesses des diverses molécules liquides n'ont pas les mêmes, on ne peut pas calculer de la même manière le volume du liquide qui passe, en une seconde, par une section transversale du tuyau. Si l'on divise le volume du liquide qui s'est écoulé en une seconde par la surface de cette section transversale, on trouvera un nombre qui ne représentera plus la vitesse des diverses molécules liquides, puisqu'elles ont des vitesses différentes; mais ce nombre représentera une vitesse moyenne, la vitesse que doit avoir le liquide, se mouvant tout d'une pièce, pour donner lieu à la même *dépense* (§ 287) : c'est ce que l'on nomme, dans ce cas, la *vitesse du liquide*, dans la section quel on considère. Si, par exemple, la surface de la section transversale du tuyau est de 3 décimètres carrés, et qu'il s'écoule dans une seconde 24 litres de liquide, ou 24 décimètres cubes, on dira que la vitesse du liquide, dans cette section, est de 8 décimètres par seconde.

§ 300. Si le tuyau dans lequel se meut le liquide présente partout la même section transversale, la vitesse du liquide sera la même dans les diverses sections que l'on peut imaginer le long de ce tuyau. Car la quantité totale de liquide comprise entre deux de ces sections ne devant pas varier, il est nécessaire que le volume du liquide qui entre dans cet espace par l'une des sections soit égal à celui du liquide qui en sort par l'autre section ; ce qui ne peut exister qu'autant que les vitesses sont les mêmes dans ces deux sections. Les diverses molécules liquides sont donc, chacune séparément, animées d'un mouvement uniforme : et en conséquence les forces qui sont appliquées à chacune d'elles doivent se faire équilibre. Si, au lieu de prendre une seule molécule, on prend la masse de liquide comprise entre deux sections transversales du tuyau, et qu'à une petite distance l'une de l'autre, on voit qu'il devra encore avoir équilibre entre toutes les forces appliquées à cette masse de liquide. Or ces forces sont de trois espèces différentes : 1° Si le tuyau, dans la partie où est placée notre masse liquide, est incliné à l'horizon, elle se trouvera comme sur un plan incliné, et sera soumise en conséquence à une des composantes de son poids qui agira dans le sens de l'axe du tuyau, et qui tendra à la faire descendre (§ 63) ; 2° les pressions que la masse liquide supporte sur les deux faces planes par lesquelles elle est en contact avec le liquide voisin, pressions qui sont dirigées en sens contraire l'une de l'autre, donneront lieu à une force unique, égale à leur différence et agissant dans le sens de la plus grande ; 3° enfin les frottements divers dont nous avons parlé, entre les diverses couches

qui glissent les unes dans les autres, donneront lieu à une force unique agissant toujours en sens contraire du mouvement du liquide. La première de ces trois forces agira dans le sens du mouvement, si le liquide descend dans la partie inclinée du tuyau où nous l'avons supposé placé : elle agira en sens contraire du mouvement, si le liquide monte, enfin elle sera nulle, si la portion de tuyau où se trouve le liquide est horizontale. La deuxième force agira dans le sens du mouvement, ou en sens contraire, suivant que la pression exercée sur la face postérieure de la masse liquide sera plus grande ou plus petite que la pression exercée sur sa face antérieure ; elle sera nulle, si ces deux pressions sont égales. Puisque la troisième force, celle qui résulte des frottements des couches liquides les unes sur les autres et contre les parois du tuyau, est toujours dirigée en sens contraire du mouvement, il faut que l'une des deux premières au moins agisse dans le sens du mouvement ; car sans cela les trois forces auxquelles la masse liquide est soumise ne pourraient se faire équilibre. Dans tous les cas, il faut que la somme des deux forces qui agiront dans un sens soit égale à la force qui agira dans le sens opposé.

§ 304. Quand on observe l'écoulement d'un liquide dans un tuyau, on peut trouver facilement la grandeur et le sens de chacune des deux premières forces dont nous venons de parler, relativement à la tranche de liquide qui est comprise entre deux sections déterminées du tuyau. Pour la première, on évaluera le volume du liquide contenu entre ces deux sections, on en conclura son poids ; et l'on décomposera ce poids en deux composantes dirigées, l'une suivant l'axe du tuyau, l'autre suivant une perpendiculaire à cet axe (§ 63) : la première composante sera la force cherchée. Pour la seconde, on déterminera la pression supportée par chacune des deux faces de la tranche liquide (§ 224), en implantant, sur le tuyau, des tubes de verre qui s'élèvent verticalement en deux points correspondant respectivement à chacune de ces deux faces, et mesurant la hauteur à laquelle le liquide se maintiendra dans chaque tube, par suite de la pression qui existe à son extrémité inférieure dans le tuyau. La condition d'équilibre qui a été énoncée précédemment, entre les trois forces auxquelles la tranche liquide est soumise, permettra donc de trouver la grandeur de la troisième force, c'est-à-dire de la résistance occasionnée par les frottements.

Des expériences nombreuses ont fait reconnaître que, pour une même vitesse du liquide, la résistance dont il s'agit est proportionnelle à l'étendue de la surface par laquelle la tranche touche les parois du tuyau. Il en résulte que, pour des tranches prises dans un

438 PRINCIPES RELATIFS AU MOUVEMENT DES FLUIDES.

même tuyau, et occupant des longueurs différentes de ce tuyau, la résistance est proportionnelle à la longueur de la portion de tuyau dans laquelle se trouve la tranche; il en résulte encore que des tranches de même longueur et animées d'une même vitesse, prises dans des tuyaux différents, la résistance est proportionnelle au contour de la section transversale qui sert de base à chaque tranche.

Lorsque la vitesse du liquide varie, la résistance produite par les frottements varie aussi, contrairement à ce qui arrive dans le frottement de deux corps solides l'un sur l'autre (§ 126). À égalité de surface de contact d'une tranche liquide avec les parois du tuyau, la résistance qu'éprouve cette tranche est d'autant plus grande que la vitesse du liquide est plus considérable. Quant à la loi suivant laquelle la résistance varie avec la vitesse, on peut se la représenter en admettant que cette résistance est la somme de deux forces, dont l'une est proportionnelle à la vitesse du liquide, et l'autre proportionnelle au carré de cette vitesse. En sorte que, si la vitesse devient double, triple, quadruple... de ce qu'elle était d'abord, la résistance supportée par la tranche liquide variera dans un rapport plus grand que celui des nombres 2, 3, 4... : mais elle ne variera pas dans un rapport aussi grand que leurs carrés 4, 9, 16.

§ 302 La pression qui a lieu à l'intérieur du liquide qui coule uniformément le long d'un tuyau varie généralement d'une section transversale à une autre. La quantité dont elle varie est déterminée par la condition d'équilibre de la tranche liquide comprise entre ces deux sections transversales. Supposons, par exemple, qu'il s'agisse d'un tuyau droit AB, fig. 378, par lequel s'écoule uniformément

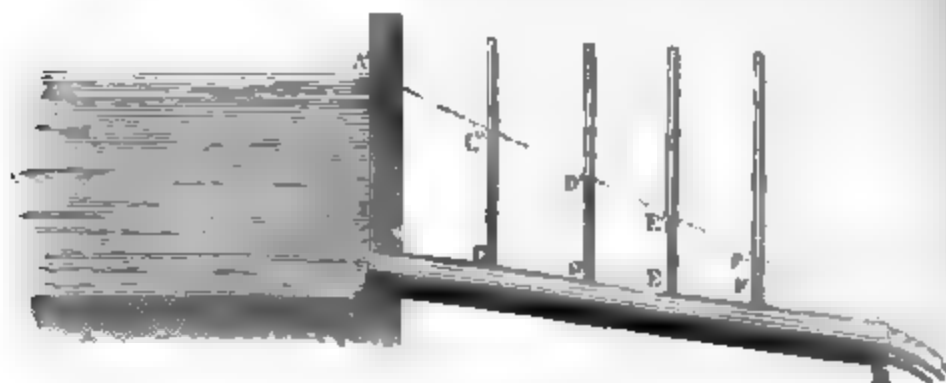


Fig. 378.

l'eau d'un réservoir. Si nous comparons les pressions qui ont lieu aux points C, D, E, F, à l'intérieur du tuyau, nous reconnaitrons

DES COUDES ET DES ÉTRANGLEMENTS. 539

proportionnellement aux distances CD, DE, EF, et ces points. Imaginons pour cela des sections transversales dans le liquide par les points C, D, E, F. Les tranches CD, DE, EF ont des poids proportionnels à leurs longueurs; et de ces poids, dans le sens de l'axe du tuyau, sont opposées à leurs longueurs, puisque le tuyau est droit, et que son inclinaison est partout la même. D'une part, les résistances qu'éprouvent ces diverses tranches dans le fluide sont également proportionnelles aux longueurs des tranches; et d'autre part, les pressions du fluide contre lesquelles elles frottent (§ 304). Donc, l'équilibre de l'équilibre entre les forces qui agissent sur ces tranches (§ 300), les différences des pressions qui existent aux extrémités doivent être proportionnelles aux longueurs; les différences des pressions en C et en D, en D et en E, en E et en F, doivent être dans le même rapport que les distances CD, DE, EF. Si les distances CD, DE, EF sont égales, la différence de pression variera autant de C en D, que de D en E,

et les pressions qui ont lieu aux divers points C, D, E, F, dans des tubes de verre qui s'élèvent verticalement, nous avons déjà indiqué (§ 304). L'excès de la pression, au-dessus de la pression atmosphérique, sera la hauteur à laquelle l'eau s'élèvera dans le tube de verre. Il est aisé de conclure de ce qui précède que les points C', D', E', F', des colonnes d'eau que l'on obtiendra en équilibre sur une ligne droite. De plus cette ligne droite, qui sera la surface libre de l'eau du réservoir, devra passer par l'extrémité du tuyau, A', situé sur la surface libre de l'eau du réservoir, au-dessus de l'origine A du tuyau. C'est ce que l'expérience confirme complètement.

Des coudes et des étranglements. — Souvent les conduites des liquides présentent des coudes, où leur direction doit changer. Ces coudes, analogues aux coudes des tuyaux de poêle, occasionnent toujours de grandes résistances au mouvement des liquides qui doivent les traverser. Lorsque les filets liquides arrivent dans un coude, ils subissent un brusque changement de direction; ce changement brusque de direction entraîne toujours une diminution de la vitesse des molécules, et par conséquent une perte de la vitesse des molécules entraîne toujours une diminution de la vitesse des molécules. Il en résulte donc que, pour le mouvement d'un liquide, avec une vitesse donnée, dans une conduite qui contient des coudes, il faudra employer une plus

440 PRINCIPES RELATIFS AU MOUVEMENT DES FLUIDES

grande quantité de travail que si ces coudes n'existaient pas. Pour éviter les pertes de travail, qui sont des conséquences de cette disposition, doit-on faire en sorte que le changement de direction des filets liquides ne s'opère que progressivement pour cela, au lieu de raccorder les deux portions de tuyau dont les directions sont différentes, en les réunissant au moyen d'un coude, il faut les relier l'une à l'autre par un tuyau courbe, dont la courbure ne soit pas trop grande. En arrondissant ainsi le chemin que doit parcourir le liquide, on ramènera la résistance qui s'oppose à son mouvement à être sensiblement la même que si le tuyau était dans une même direction dans toute sa longueur.

Si le tuyau, dans lequel circule un liquide, présente subitement un étranglement brusque, le passage du liquide par cet étranglement occasionne encore une perte de travail, qui est dûment due au changement brusque qu'éprouve la vitesse des molécules liquides, changement qui porte plutôt sur la grandeur de la vitesse que sur sa direction. La résistance occasionnée par le rétrécissement intérieur du tuyau serait beaucoup moindre, si le rétrécissement se produisait peu à peu, de manière à modifier progressivement la vitesse des molécules liquides, car cette vitesse doit être d'autant plus grande, que la section du tuyau, au point où se trouvent ces molécules, devient plus petite. Cependant le rétrécissement, tout en se faisant sentir peu à peu, donnera toujours une plus grande résistance que s'il n'existait pas. Car, d'une part, le liquide y prend une vitesse plus grande que dans le reste du tuyau; d'une autre part, une même masse liquide touche lors de son passage sur une étendue de surface d'autant plus grande que le diamètre du tuyau est plus petit : donc, pour cette double raison, les frottements qu'éprouve le liquide (§ 304), sont augmentés par la présence du rétrécissement du tuyau. On voit par là qu'il faut toujours avec soin de faire couler les liquides par des passages étroits, et de ne pas donner lieu aux pertes de travail qui en résulteraient; que, si l'on ne peut pas faire autrement, il faut disposer les tuyaux de manière à déterminer que progressivement le changement que doit éprouver la vitesse des molécules liquides, lorsqu'elles sont obligées de traverser des étranglements.

§ 304 Nous avons dit précédemment (§ 440) que, dans certaines circonstances exceptionnelles, on a besoin d'augmenter l'action des résistances passives qui se développent dans le mouvement, afin de modérer la vitesse des corps qui se meuvent. Quand il s'agit d'un liquide qui coule dans un tuyau, on y parvient en produisant

ge un étranglement plus ou moins prononcé. Pour cela, on met sur le tuyau un robinet tellement construit que, lorsqu'il est tourné convenablement, son ouverture se raccorde avec le tuyau; en sorte que le liquide s'écoule, en traversant le robinet, exactement de la même manière que s'il n'existait pas. Lorsqu'ensuite on voudra modérer l'écoulement du liquide, on tourne un peu le robinet, *fig. 379*; son ouverture ne

coïncide plus avec les parois du tuyau, il se forme un étranglement, qui donnera lieu à une diminution de la vitesse des molécules liquides.



Fig. 379.

L'effet produit ainsi est d'autant plus marqué que le robinet aura été tourné d'une plus grande quantité.

On peut employer encore un autre moyen, qui consiste à disposer une soupape à gorge à l'intérieur du tuyau. Ce n'est autre chose qu'un disque circulaire, fixé à un axe qui traverse le tuyau transversalement, et qui s'applique sur la surface du disque de manière à former avec un de ses diamètres. En faisant tourner cet axe sur son point, on fait tourner en même temps le disque, qui peut prendre des positions différentes à l'intérieur du tuyau.

On place ce disque de manière que son plan soit perpendiculaire à l'axe du tuyau, il s'applique sur tout son diamètre contre les parois, et ferme entièrement le passage au liquide. Si au contraire le plan du disque est parallèle à l'axe du tuyau, il ne présente que sa tranche au liquide, qui peut passer librement de chaque côté. Dans ce cas, la présence du disque ne rétrécit pas beaucoup l'espace offert au passage au liquide. En donnant au disque des positions intermédiaires entre celles dont nous venons de parler, on aura un rétrécissement plus ou moins grand, qui entraînera une diminution correspondante dans la vitesse du liquide.



Fig. 380.

On a des exemples de soupapes à gorge dans les cheminées de poêle, *fig. 380*, dont on se sert pour modérer en cas de besoin le mouvement ascendant de la fumée dans le tuyau.

105 **Jets d'eau.** — Nous avons dit (§ 286) que, lorsqu'un liquide s'écoule par un orifice percé de manière à produire un jet dirigé de bas en haut, ce jet s'élève à peu près jusqu'à la hauteur du liquide dans le réservoir. C'est en cela que consiste le prin-

son mouvement a être sensiblement la même que une même direction dans toute sa longueur.

Si le tuyau, dans lequel circule un liquide, présente un étranglement brusque, le passage du étranglement occasionne encore une perte de travail due au changement brusque qu'éprouve les molécules liquides, changement qui porte plutôt sur la vitesse que sur sa direction. La résistance occasionnée par le rétrécissement intérieur du tuyau serait beaucoup plus grande si le rétrécissement se produisait peu à peu, de manière à ne diminuer que graduellement la vitesse des molécules liquides ; car la résistance serait d'autant plus grande, que la section du tuyau traversée par ces molécules, devient plus petite. Cependant, tout en se faisant sentir peu à peu, donne une plus grande résistance que s'il n'existait pas. Le liquide y prend une vitesse plus grande que dans un tuyau ; d'une autre part, une même masse liquide se trouve répartie sur une étendue de surface d'autant plus grande que le diamètre du tuyau est plus petit : donc, pour cette raison, les frottements qu'éprouve le liquide (§ 304) sont augmentés par l'absence du rétrécissement du tuyau. On voit par là qu'il faut avec soin de faire couler les liquides par des passages brusques, de ne pas donner lieu aux pertes de travail qui en

sage un étranglement plus ou moins prononcé. Pour cela, on pose sur le tuyau un robinet tellement construit que, lorsqu'il est tourné convenablement, son ouverture se raccorde avec le tuyau; en sorte que le liquide s'écoule, en traversant le robinet, exactement de la même manière que s'il n'existait pas. Lorsqu'ensuite on voudra modérer l'écoulement du liquide, on tourne un peu le robinet, *fig. 379*; son ouverture ne se raccorde plus avec les

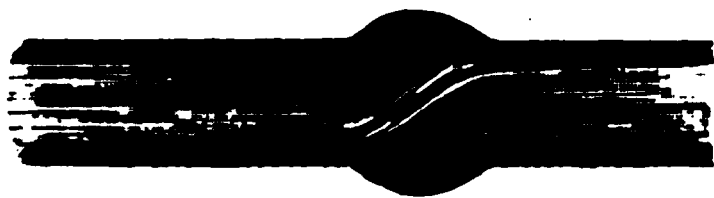


Fig. 379.

voisines du tuyau, produira un étranglement brusque, qui donnera lieu à une diminution de la vitesse des molécules liquides. L'effet produit ainsi est d'autant plus marqué que le robinet aura été tourné d'une plus grande quantité.

On peut employer encore un autre moyen, qui consiste à disposer une soupape à gorge à l'intérieur du tuyau. Ce n'est autre chose qu'un disque circulaire, fixé à un axe qui traverse le tuyau transversalement, et qui s'applique sur la surface du disque de manière à former avec un de ses diamètres. En faisant tourner cet axe sur son point de support, on fait tourner en même temps le disque, qui peut prendre ainsi des positions différentes à l'intérieur du tuyau.

On place ce disque de manière que son plan soit perpendiculaire à l'axe du tuyau, il s'applique sur tout son tour contre les parois, et ferme entièrement le passage au liquide. Si au contraire le plan du disque est parallèle à l'axe du tuyau, il ne présente que sa tranche au liquide, qui peut passer librement de chaque côté; dans ce cas, la présence du disque ne rétrécit pas beaucoup l'espace offert au passage du liquide. En donnant au disque des positions intermédiaires entre celles dont nous venons de parler, on aura un rétrécissement plus ou moins grand, qui entraînera une diminution correspondante dans la vitesse du liquide. On a des exemples de soupapes à gorge dans les poêles, *fig. 380*, dont on se sert pour modérer en cas de besoin le mouvement ascendant de la fumée dans le tuyau.



Fig. 380.

105. *Jets d'eau.* — Nous avons dit (§ 286) que, lorsqu'un liquide s'écoule par un orifice percé de manière à produire un jet vertical dirigé de bas en haut, ce jet s'élève à peu près jusqu'à la hauteur du liquide dans le réservoir. C'est en cela que consiste le prin-



de donner au tuyau de conduite un assez grand et diminuer la vitesse de l'eau dans le tuyau, et l'on temps l'étendue de la portion de paroi qui est toute masse de liquide (§ 301). On détermine ordinairement du tuyau de manière que l'eau n'y ait pas une 2 ou 3 décimètres par seconde.

Si l'orifice d'écoulement était muni d'un ajutage les filets liquides, en changeant brusquement leur suiterait encore une diminution très notable dans l'ajutage cylindrique, par exemple, diminue le ment d'un liquide dans le rapport de 1 à 0,82 (§ laquelle le liquide peut s'élever verticalement, en à la sortie de l'ajutage, n'est donc que les 0,67 (0 0,82), ou environ les $\frac{2}{3}$ de celle à laquelle il s'était était pratiqué en mince paroi. Pour ne pas nuire jet, on devra pratiquer l'orifice dans une plaque ou bien construire un orifice évasé (§ 292). Mais deux dispositions est préférable, en regard à la hauteur de la colonne liquide ascendante, qui seraient de l'adhérence des filets liquides avec les parois.

La hauteur à laquelle l'eau jaillit est encore diminuée de l'air, et aussi par la chute du liquide, qui teint la plus grande hauteur à laquelle il pouvait

L'eau sort des divers orifices est la même pour tous : les jets qui en résultent prennent donc la forme de paraboles répondant toutes à une même vitesse de projection (§ 406). L'amplitude horizontale varie d'un jet à un autre, suivant la direction de l'orifice qui donne naissance au jet ; la plus grande amplitude correspond au jet dont la direction initiale fait un angle de 45° avec l'horizon, et cette amplitude est double de la hauteur à laquelle s'élève verticalement le jet central.

Puits artésiens. — Il existe dans la terre, à des profondeurs plus ou moins grandes au-dessous du sol, des nappes d'eau très grande étendue. L'eau y est généralement en mouvement et cela constitue de véritables courants souterrains. Lorsque l'on creuse un puits assez profond pour atteindre de pareilles nappes, le liquide s'élève dans le puits, ordinairement jusqu'à la surface, et souvent il se produit un jet vertical à une hauteur plus ou moins grande au-dessus de la surface du sol. Les puits de ce genre portent le nom de *puits artésiens*. Ce nom leur vient de ce qu'on s'en est principalement occupé dans les temps modernes ; mais il n'est pas douteux que ces puits n'aient été connus dans l'antiquité : on en trouve l'usage dans les oasis d'Égypte, qui doivent remonter à des temps très reculés.

Pour rendre compte complètement des phénomènes que l'on observe dans les puits artésiens, il faut se rappeler que l'écorce terrestre est généralement formée, dans le voisinage de sa surface, d'un grand nombre de couches superposées. Ces couches, de différentes épaisseurs, ont souvent une étendue très grande. Leur épaisseur n'est pas constante pour chacune d'elles, présente cependant une certaine régularité ; et si cette épaisseur diminue ou augmente d'une couche à une autre, ce n'est que progressivement. Les différentes couches superposées qui constituent un terrain sont donc séparées les unes des autres par des surfaces qu'on peut regarder comme sensiblement parallèles entre elles. Mais ces surfaces de séparation, qui ont dû être horizontales dans leur état primitif, lors de la formation des couches, ont généralement subi des déformations par suite des mouvements géologiques que la terre a éprouvés ultérieurement. Il en résulte qu'actuellement les couches sont ordinairement inclinées, et que cette inclinaison varie d'un point à un autre.

Supposons maintenant qu'un terrain soit formé de couches successives, fig. 384, comme nous venons de le dire, et que parmi ces couches il s'en trouve une AA dans laquelle l'eau puisse se

444 PRINCIPES RELATIFS AU MOUVEMENT DES PL
 mouvoir facilement ; cette couche sera formée de sable
 ple, ou bien de matières qui présentent un grand nombr



Fig. 381.

Concevons de plus que cette couche soit comprise en
 tres BB, CC, qui se laissent difficilement traverser
 mieux encore qui soient tout à fait imperméables. Si
 quantité d'eau s'introduit dans la couche AA, elle circ
 interstices que présentent les matières dont cette cou
 posée ; mais elle ne pourra en sortir, ni en traversant
 ricure, ni en traversant sa face inférieure : elle sera
 l'intérieur de la couche AA par la présence des deux co
 qui forment comme deux barrières qu'elle ne peut pas

Les points où la couche AA se termine seront
 situés sur la surface du sol : ce sont les points où ell
 cette surface, et que l'on nomme ses affleurements.
 se meuvent à la surface du sol, telles que les eaux de
 encore les eaux des ruisseaux et des rivières, peuvent
 dans la couche AA par ses affleurements ; en sorte qu
 doit être habituellement pleine d'eau. Si les affleu
 couche étaient tous exactement à un même niveau,
 contiendrait serait à l'état d'équilibre, et formerait un
 immobile Mais il n'en est jamais ainsi : il existe touj
 affleurements d'une couche, certains points qui sor
 que d'autres. Si l'eau extérieure s'infiltré dans la co
 points situés à un niveau supérieur à celui des affle
 plus bas, elle ne pourra plus s'y maintenir en équilib
 nécessairement par ces affleurements, il se produira
 rant continuuel à l'intérieur de la couche : l'eau entrer
 sortira de l'autre

Soit D, fig. 381, le point d'entrée de l'eau dans la

point de sortie. Si l'on vient à percer en F un puits vertical jusqu'à la couche AA, l'eau du courant souterrain montera dans ce puits, et pourra jaillir au-dessus de l'orifice F. Supposons d'abord qu'on ait adapté à cet orifice un tuyau vertical d'une grande hauteur, dans lequel l'eau soit obligée de rester, sans pouvoir couler au dehors. Si aucune partie des affleurements de la couche ne se trouvait au-dessous du point d'entrée D, l'eau monterait dans le tuyau jusqu'au point H, situé au niveau du point D, en vertu du principe de l'équilibre d'un liquide dans des vases communiquants. Mais si l'eau, entrant par le point D, sort par le point E plus bas que le premier, elle ne peut pas s'élever dans le tuyau jusqu'en H, sa surface libre s'arrêtera en un point K, inférieur au point D et supérieur au point E. Le puits FG et le tuyau qui le surmonte jouent ici, par rapport à la couche dans laquelle existe le courant souterrain, le même rôle que les tubes de verre implantés aux points C, D, E, F, du tuyau AB, fig. 378 page 438. On voit par là que le point K, fig. 384, qu'on peut appeler le *niveau d'équilibre* du puits artésien FG, sera d'autant plus bas que ce puits sera plus près du point de sortie E du courant souterrain; en sorte que, ainsi qu'on l'a observé plusieurs fois, le niveau d'équilibre peut être très différent, pour des puits artésiens peu éloignés les uns des autres, et aboutissant à une même nappe d'eau.

Le niveau d'équilibre du puits FG étant toujours supposé en K, si l'on n'adapte pas de tuyau à l'orifice de ce puits, l'eau jaillira au-dessus du sol, mais elle sera loin de s'élever jusqu'au point K. Pour que l'eau pût jaillir ainsi jusqu'à son niveau d'équilibre, il faudrait que rien ne s'opposât au mouvement qu'elle tend à prendre sous l'action de la pression qu'elle éprouve à la partie inférieure du puits. Mais c'est ce qui ne peut avoir lieu : en s'élevant à l'intérieur du puits, qui est habituellement étroit et profond, elle développe des frottements qui retardent son mouvement, et elle ne peut prendre qu'une vitesse très inférieure à celle qu'elle prendrait sans ces frottements.

Si l'on adapte à l'orifice du puits un tuyau qui ne s'élève pas jusqu'au niveau d'équilibre K, l'eau montera dans ce tuyau et s'écoulera par sa partie supérieure. La vitesse de l'écoulement sera d'autant plus faible que l'extrémité supérieure du tuyau sera plus rapprochée du point K. La quantité d'eau fournie par le puits diminuera donc de plus en plus à mesure qu'on cherchera à la faire monter plus haut à l'aide d'un pareil tuyau; et elle finira par devenir nulle, si l'on veut à faire monter jusqu'au niveau d'équilibre.

On ne donne ordinairement aux puits artésiens que de petites dimensions transversales : ce sont des trous cylindriques de quelques décimètres de diamètre, et d'une profondeur quelquefois très grande, que l'on creuse à l'aide d'outils de diverses formes, adaptés soit à l'extrémité d'une tige de fer qu'on allonge ou qu'on raccourcit à volonté, soit simplement à l'extrémité d'une corde. Ces puits doivent généralement être munis, dans une grande partie de leur profondeur, sinon dans la totalité, d'un tuyau de revêtement destiné à prévenir les éboulements des parois. On peut citer comme exemple remarquable de puits artésien celui que la ville de Paris a fait creuser à l'abattoir de Grenelle, à une profondeur de 516 mètres, et dont l'eau s'élève, dans un tuyau, à une hauteur de 37 mètres au-dessus du sol.

§ 307. Pour déterminer le niveau d'équilibre d'un puits artésien, il n'est pas nécessaire d'adapter à son orifice un tuyau vertical qui s'élève jusqu'au-dessus de ce niveau : ce moyen, qu'il serait très difficile d'employer dans certains cas, peut être remplacé par le suivant. On ferme complètement l'orifice du puits à l'aide d'un tampon qu'on maintiendra solidement pour résister à la pression que l'eau exercera sur sa face inférieure ; puis on adaptera à cette ouverture ménagée dans ce tampon un tuyau communiquant à un manomètre §§ 260 et 264. L'air du tuyau, comprimé par l'eau du puits qui s'y introduira, pressera à son tour le mercure du manomètre ; et la pression ainsi produite pourra être évaluée en atmosphères. Si l'on retranche une unité du nombre d'atmosphères ainsi obtenu, et que l'on multiplie $10^m,33$ (§ 245) par le reste de la soustraction, on aura en mètres la hauteur du niveau d'équilibre du puits au-dessus de son orifice. On voit en effet que la pression exercée par l'eau sur la face inférieure du tampon, pression qui est mesurée par le manomètre, est précisément celle qui soutiendrait une colonne d'eau s'élevant jusqu'au niveau d'équilibre, dans le cas où le puits, n'étant plus fermé, serait muni d'un tuyau d'une hauteur convenable. La pression dont il s'agit serait équilibrée à cette colonne d'eau et à la pression atmosphérique qui s'exercerait sur sa surface supérieure : elle sera donc de 2, de 3, de 4, ... atmosphères, suivant que la hauteur du niveau d'équilibre au-dessus de l'orifice du puits sera de 4 fois, 2 fois, 3 fois, ... $10^m,33$.

Il arrive souvent que la quantité d'eau fournie par un puits artésien diminue. Cette diminution peut être attribuée à deux causes ou bien à ce que le courant souterrain n'exerce plus une aussi grande pression à l'extrémité inférieure du puits, ou bien à ce que l'intérieur du puits s'est obstrué par des éboulements ou par l'accumu-

1, en certains points, des matières solides que l'eau entraîne elle. La détermination du niveau d'équilibre peut faire connaître immédiatement à laquelle de ces deux causes est dû l'affaiblissement du débit du puits. Dans le premier cas, on trouvera que l'eau s'est abaissée; dans le second, au contraire, on trouvera qu'elle n'a pas varié.

Il existe certains puits artésiens dont le débit varie avec la hauteur de l'eau dans un cours d'eau voisin; une élévation du niveau de ce cours d'eau est accompagnée d'une augmentation dans la quantité d'eau que fournit le puits. De même le débit de certains puits artésiens, situés dans le voisinage de la mer, varie périodiquement avec les marées; ce débit augmente ou diminue, suivant que le niveau des eaux, dans la mer voisine, monte ou descend. Il est facile de se rendre compte de ces phénomènes d'après ce que nous avons dit précédemment. Les affleurements inférieurs de la couche aquifère aboutit le puits, ceux par lesquels sort l'eau qui se soutient dans cette couche, peuvent être placés de différentes manières. Si les affleurements existent en des points de la surface du sol qui ne sont pas habituellement recouverts d'eau, ils donnent lieu à des sources visibles; mais il n'en est plus de même s'ils sont situés sous l'eau d'une rivière ou de la mer. Dans ce dernier cas, l'orifice de l'entrée du courant d'eau souterrain supporte une pression due à la différence du niveau de l'eau dans la rivière ou dans la mer au-dessus de l'orifice. Si cette hauteur vient à varier, la pression varie dans le même sens, aux divers points du courant souterrain, de quantités plus ou moins grandes, suivant que ces points sont plus ou moins éloignés de son orifice de sortie. Le niveau d'équilibre d'un puits alimenté par ce courant s'élèvera donc et s'abaissera, en même temps que le niveau de l'eau qui presse sur les affleurements inférieurs de la couche, et par suite le débit du puits augmentera ou diminuera en même temps.

308. Si le niveau d'équilibre d'un puits artésien se trouve au-dessous de la surface du sol, l'eau ne peut pas monter jusqu'à l'orifice et par suite ce puits ne peut fournir de l'eau que comme les puits ordinaires, à la condition qu'on emploie des moyens particuliers pour l'élever jusqu'à la surface du sol. Mais si, au lieu d'y puiser de l'eau, on y en introduit, au contraire, ce qui tend à y faire monter le niveau, l'équilibre sera rompu. La colonne d'eau contenue dans le puits deviendra trop haute pour être soutenue par la pression qui s'exerce à sa partie inférieure; et en conséquence elle descendra, de manière à rétablir le niveau où il était précédemment.

On pourra donc faire arriver continuellement de l'eau dans

un pareil puits, sans qu'il s'emplisse, cette eau s'écoulera dans la nappe souterraine à laquelle il communique : on aura ainsi ce qu'on nomme un *puits absorbant*.

On se sert très souvent de puits absorbants, tels que ceux dont nous venons de parler, pour se débarrasser d'eaux nuisibles, ou pour dessécher des terrains marécageux, soit pour faire disparaître l'humidité du sol dans le voisinage de constructions importantes auxquelles elle pourrait porter préjudice, soit enfin pour faire disparaître des eaux malsaines provenant d'un établissement industriel.

Il existe un exemple remarquable de puits absorbant à Saint-Denis, près Paris. En perceant un puits artésien sur la place de la Poste aux chevaux, on rencontra d'abord une couche absorbante puis plus bas une nappe d'eau jaillissante, et plus bas encore une seconde nappe jaillissante, dont l'eau était de meilleure qualité que celle de la précédente. On disposa dans ce puits trois tuyaux concentriques, s'élevant tous trois jusqu'à la surface du sol, mais descendant à des profondeurs différentes. Le tuyau intérieur, plus étroit que les deux autres, fut établi jusqu'à la seconde nappe jaillissante. Le second tuyau, enveloppant le premier, de manière à laisser un espace libre entre eux, descendit jusqu'à la première nappe jaillissante. Enfin le troisième tuyau, enveloppant le second de la même manière, ne descendit que jusqu'à la couche absorbante. Par cette disposition, les eaux de la nappe jaillissante inférieure montent par le tuyau central, celles de la nappe jaillissante supérieure montent par l'espace annulaire compris entre le premier tuyau et le second ; et l'excédant de ces eaux, qui n'est pas employé pour l'usage de la ville, s'écoule dans la couche absorbante, par l'espace annulaire compris entre le second et le troisième tuyau.

§ 309. **Mouvement de l'eau dans les canaux.** — Lorsque l'eau contenue dans un canal y est animée d'un mouvement en vertu duquel elle le parcourt dans toute sa longueur, ce mouvement est régulier tant que les circonstances dans lesquelles il se produit restent les mêmes. Le canal étant supposé avoir partout la même forme et les mêmes dimensions, tant en largeur qu'en profondeur, et l'inclinaison de son fond ne variant pas d'un point à un autre, on trouvera que le mouvement du liquide est exactement le même dans les diverses sections transversales qu'on pourra imaginer dans toute son étendue. D'après cela il est clair que chaque molécule doit se mouvoir uniformément et en ligne droite, et que la surface libre du liquide doit être plane et inclinée dans le sens du courant, de manière à être parallèle au fond du canal.

mouvement de l'eau dans un canal peut être assimilé au mouvement d'un liquide dans un tuyau dont les dimensions transversales sont uniformes dans toute sa longueur. La seule différence consiste en ce que, dans le canal, l'eau présente une surface libre, tandis que, dans le tuyau, le liquide est entièrement enveloppé par des parois solides. Les considérations développées précédemment (§§ 298 à 304) seront donc applicables au mouvement de l'eau dans un canal, à la condition de tenir compte de la différence qui vient d'être signalée.

En premier lieu, les différents filets liquides ne sont pas animés d'une même vitesse (§ 298) ; ils se meuvent d'autant plus vite qu'ils sont plus éloignés des parois solides entre lesquelles l'eau coule. Celui de ces filets liquides qui est animé de la plus grande vitesse doit se trouver sur la surface libre, au milieu de la largeur du canal, et si, à partir de ce filet liquide, on se rapproche des bords ou du fond du canal, dans une direction quelconque, on trouvera des filets de plus en plus petites. Ce n'est cependant pas exactement comme les choses se passent ; la plus grande vitesse des molécules liquides ne s'observe pas sur la surface même de l'eau : mais au-dessous. Cela tient à la présence de l'air atmosphérique qui, étant en contact avec la surface de l'eau, exerce aussi une résistance à son mouvement, et empêche ainsi les filets liquides qui sont à la surface de prendre la vitesse qu'ils prendraient s'ils étaient plus bas.

Pour s'assurer de ce fait, que la vitesse de l'eau, au milieu de la largeur du canal, est moindre à la surface qu'à une petite distance au-dessous, on peut se servir de deux boules de cire liées l'une à l'autre par un fil d'une petite longueur. En mêlant à la cire de petites quantités d'autres substances, on peut faire en sorte que l'une des deux boules ait une densité moindre que celle de l'eau, et que l'autre au contraire ait une densité plus grande, de telle manière cependant que l'ensemble de ces deux boules puisse flotter sur l'eau, sans que la plus légère dépasse sensiblement la surface. Si ces deux boules sont mises dans une eau tranquille, elles se disposeront l'une au-dessous de l'autre, et le fil qui les réunit sera vertical. Mais si on les place au milieu du courant qui existe dans un canal, elles sont enlevées par l'eau, et le fil qui les réunit n'est plus vertical.



Fig. 382.

Fig. 382 ; la boule inférieure se place en avant de la boule supérieure. Il est évident que cette position, que prennent

les boules dans le courant, ne peut être due qu'à ce que la vitesse de l'eau est un peu plus grande à une faible distance au-dessous de la surface qu'à la surface même.

Les molécules liquides qui traversent une même section transversale du canal étant animées de vitesses différentes, on appelle vitesse de l'eau, une vitesse moyenne entre celles de ces diverses molécules : ce sera la vitesse dont toutes les molécules devraient être animées à la fois, pour que la quantité d'eau qui traverse en une seconde la section que l'on considère reste la même (§ 319). D'après cette définition de la vitesse du courant, on voit que quand on la connaîtra, il suffira de la multiplier par la surface de la section transversale du liquide, pour obtenir le volume de l'eau qui passe en une seconde par cette section transversale c'est-à-dire ce que l'on nomme le *débit* du canal.

§ 340. L'uniformité du mouvement de chaque molécule liquide exige qu'il y ait équilibre entre les forces qui lui sont appliquées, et par conséquent aussi entre les forces auxquelles est soumise une tranche liquide comprise entre deux sections transversales très rapprochées. Or les forces appliquées à une pareille tranche sont de trois espèces (§ 300) : 1° le fond du canal étant incliné dans le sens du mouvement, le poids de la tranche que l'on considère donne une composante parallèle à ce fond, qui tend à accélérer son mouvement, 2° les deux faces de la tranche supportent des pressions de la part du liquide voisin ; 3° la tranche liquide éprouve une résistance occasionnée par son frottement contre les parois solides qui la renferment, et aussi contre l'air avec lequel elle est en contact. Mais les pressions que la tranche éprouve sur ses deux faces sont évidemment égales entre elles ; car la surface de l'eau étant partout soumise à la pression atmosphérique, les pressions qui ont lieu aux divers points d'une section transversale du liquide doivent être les mêmes, en quelque endroit du canal que cette section ait été prise. Les pressions supportées par notre tranche liquide sur ses deux faces se détruisant mutuellement, il ne reste que les deux autres forces, qui, en conséquence, doivent se faire équilibre. La composante du poids de la tranche liquide dans le sens du mouvement doit donc être égale à la résistance produite par son frottement contre les bords et le fond du canal et contre l'air. On voit par là que l'inclinaison du fond du canal est indispensable pour que l'écoulement régulier puisse avoir lieu. De plus, la composante du poids d'une tranche liquide, dans le sens du mouvement, étant d'autant plus grande que l'inclinaison du fond est plus forte, on voit que la vitesse du courant augmentera avec cette inclinaison ;

en effet que la vitesse soit assez grande pour que le frottement contre les parois, frottement qui croît avec cette vitesse, devienne capable de faire équilibre à cette composante de la tranche.

4. Mouvement de l'eau dans les rivières. — Le mouvement de l'eau dans une rivière est analogue à celui dont nous nous occupons ; mais il ne présente pas la même régularité dans son ensemble, en raison de ce que le lit de la rivière n'a partout la même largeur ni la même profondeur, et que son lit n'a pas une pente uniforme. Cependant, si une partie de la rivière d'une certaine étendue ne contient pas de trop grandes irrégularités, on peut regarder le mouvement de l'eau comme y étant le même que dans un canal, et tout ce qui a été dit dans le chapitre précédent pour le canal pourra devenir applicable à cette partie de rivière. Évidemment la quantité d'eau qui coule dans une rivière varie depuis sa source jusqu'à son embouchure, soit à cause des affluents qui viennent s'y jeter, soit à cause des sources qui existent dans son lit. Examinons ce qui a lieu dans une étendue de rivière moins grande, dans laquelle nous admettrons que la quantité d'eau qui traverse une section transversale en une seconde est partout la même. Si l'on suit la rivière, dans toute cette étendue, on observera souvent que la vitesse du courant varie beaucoup d'un point à un autre. Ce changement de vitesse est occasionné par le changement des dimensions transversales de la rivière, soit en largeur, soit en profondeur. Nous savons en effet que, si on multiplie la surface d'une section, faite dans la masse liquide, perpendiculairement à la direction du courant, par la vitesse du courant qui lui correspond, on obtient le volume de liquide qui traverse cette section en une seconde (§ 309) ; et puisque ce volume est le même pour toutes les sections faites dans la portion de rivière sur laquelle nous nous occupons, il en résulte que, plus la surface d'une section transversale de la masse d'eau sera petite, plus la vitesse du courant y sera considérable. D'après cela, dans les endroits où la rivière sera large et profonde, l'eau sera presque stagnante, tandis que dans les lieux où son lit sera resserré et peu profond, l'eau coulera avec une grande vitesse.

Prenez deux tranches liquides de même volume, et comprises entre deux sections transversales du courant, faites à peu près à la même distance l'une de l'autre. Supposons que la première de ces sections corresponde à un point de la rivière où le lit est large et profond, et qu'en conséquence sa vitesse soit faible ; et que la seconde tranche au contraire corresponde à un point où le lit est

452 PRINCIPES RELATIFS AU MOUVEMENT DES FLU

étroit et peu profond, ce qui exige que sa vitesse soit que celle de la première. La condition de l'égalité de ces deux tranches fait que la distance des sections terminent la seconde, et qui en forment comme les doit être plus grande que la distance correspondante première tranche. D'après cela, on admettra sans difficulté que la seconde tranche frotte sur une plus grande étendue de lit que la première. D'ailleurs cette seconde tranche a une plus grande vitesse que la première tranche, puisque sa surface transversale est plus petite. Donc, pour cette double raison, la résistance produite par le frottement contre les bords et le lit est plus intense pour la seconde tranche liquide que pour la première (§ 304). Cette résistance devant être vaincue pour chaque tranche, par la composante de son poids qui agit dans la direction du mouvement (§ 340), et les deux tranches étant les mêmes, il en résulte que les tranches liquides doivent se mouvoir suivant des lignes plus inclinées dans la seconde tranche que dans la première; et qu'en conséquence l'inclinaison de la surface de l'eau doit y être également plus grande. Ainsi, partout où le lit de la rivière est large et peu profond, l'eau n'est animée que d'une petite vitesse, la surface de l'eau est presque horizontale; tandis que, dans les endroits où le lit est étroit et profond, la vitesse est plus grande, la surface de l'eau est plus inclinée.

§ 342. Dans le moment des crues, la vitesse du courant d'une rivière, est bien plus grande que dans les circonstances ordinaires. Pour s'en rendre compte, il suffit de voir comment les deux forces qui doivent constamment se faire équilibre sur une tranche liquide, lorsque le niveau de l'eau vient à s'élever, changent. Nous posons qu'habituellement la surface de l'eau soit en A



Fig. 383.

mais que, par suite d'une crue, elle s'élève jusqu'en B, de sorte que la surface de la section transversale de la rivière devienne double de ce qu'elle était auparavant.

même entre deux sections transversales voisines l'une de l'autre, double de ce qu'elle était précédemment ; mais l'étranglement touché par ce liquide n'aura pas augmenté dans le rapport. Si la vitesse du courant restait la même, il n'y aurait pas d'équilibre entre la force qui tend à accélérer le mouvement du liquide et la résistance qui s'oppose à cette accélération : car la première a été doublée par l'élévation du niveau, et la seconde ne l'a pas été. Il faut donc que la vitesse du courant s'accroisse, pour que le frottement de l'eau contre les parois du canal soit capable de faire encore équilibre à la composante du poids dirigée dans le sens du mouvement.

Mesure de la vitesse de l'eau. — Pour mesurer la vitesse de l'eau dans une rivière, à une profondeur quelconque

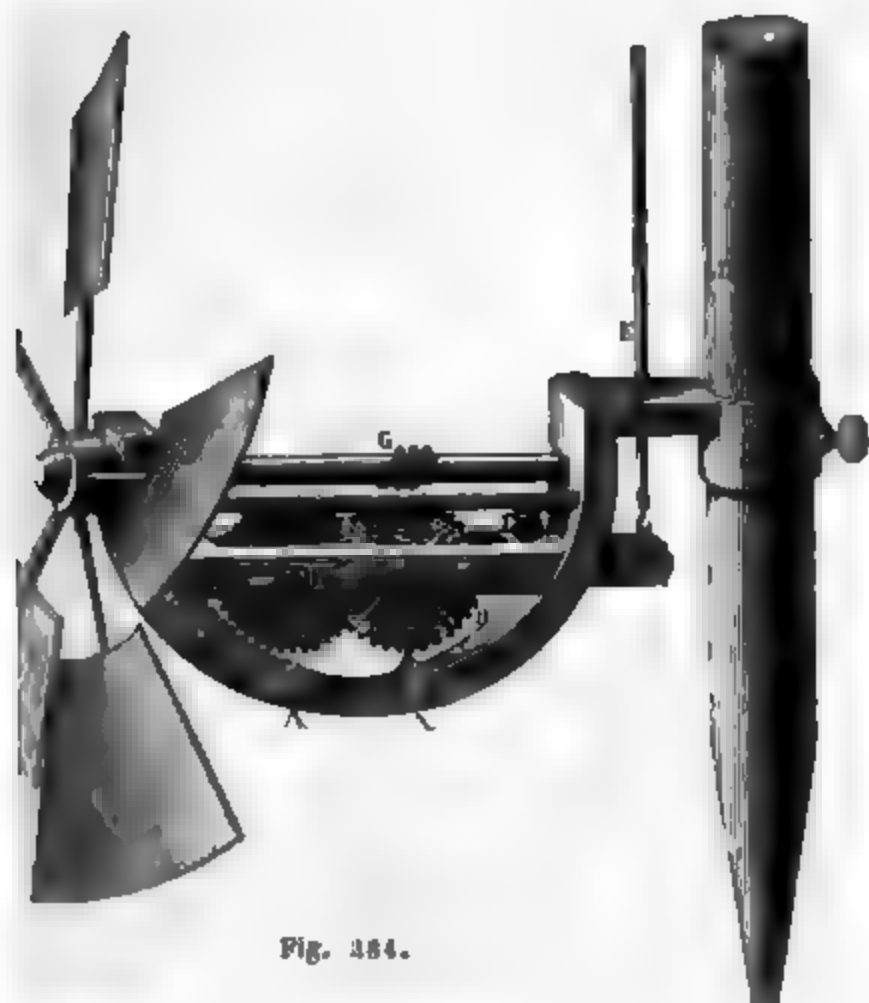


Fig. 384.

à une certaine profondeur de la surface, on peut employer avec avantage le moulinet de Voltmann, *fig. 384*. Ce moulinet consiste en une petite roue munie de plusieurs ailettes planes, qui sont fixées aux extré-

454 PRINCIPES RELATIFS AU MOUVEMENT D

mités d'autant de bras implantés sur un arbre qui porte cette roue doit être placé dans la direction de l'eau. Les filets liquides viennent raser la roue, qui se présentent toutes obliquement à l'impulsion oblique que ces ailettes reçoivent : l'eau détermine un mouvement de rotation de la roue, tant plus rapide que la vitesse de l'eau est plus grande. d'après cela, que le nombre de tours effectué par la roue en un temps donné puisse faire connaître la vitesse de l'eau.

L'appareil, que la fig. 384 représente, est disposé de manière à permettre de compter facilement les tours de l'arbre qui porte la roue. A cet effet, cet arbre porte un pignon G. Au-dessous de ce pignon, se trouve un autre pignon qui engrène avec lui, mais qui est habituellement arrêté, de sorte que la communication ne soit pas établie entre la roue et le moulinet. A côté de cette première roue, s'en trouve une autre qui est mise en mouvement par un pignon fixe qui marche beaucoup plus lentement qu'elle. Les deux roues B, B, sont portées par une pièce C mobile à l'extrémité de gauche ; une tringle E sert à soulever l'une ou l'autre de cette espèce de levier, et à élever en même temps la roue de manière à faire engrèner l'une d'elles avec la roue fixe. Lorsqu'on ne tire pas la tringle E de bas en haut, elle se maintient sous l'action d'un ressort F, dont la partie supérieure est fixée sur la monture de l'appareil ; alors les deux roues B, B, en même temps, et deux petites saillies A, A, pénètrent dans les rainures pour les empêcher de tourner. L'appareil peut glisser dans toute la hauteur d'une longue tige D qui sert à le fixer en un point déterminé de cette tige.

Pour installer le moulinet, on le fait monter sur la tige D, de sorte qu'il se trouve à la hauteur à laquelle il doit être placé au-dessus du fond de la rivière : on le fixe dans ce point, et on introduit la tige D dans l'eau, en la plaçant de manière que son extrémité inférieure touche le fond et s'enfonce un peu, et que le moulinet soit placé en travers du courant. Au bout de quelques instants, la roue commence un mouvement uniforme de rotation, sous l'impulsion du courant. On tire la tringle E, et l'on met ainsi les roues B, B, en communication avec l'arbre du moulinet. On maintient cette communication pendant un certain temps, pendant une minute, par exemple ; on relâche la tringle E : les roues s'abaissent, cessent de tourner avec l'arbre qui tourne, et s'arrêtent aussitôt.

les saillies A, A, qui pénètrent entre leurs dents. On retire le moulinet, et d'après la position que les saillies A, A, occupent par rapport aux roues B, B, on compte aisément le nombre total de tours que la roue de droite a tourné pendant la durée de l'expérience. On a en même temps le nombre des tours effectués par le moulinet pendant ce temps : car, à chaque tour de son arbre, le pignon G fait tourner cette roue d'une dent.

Il est évident sans difficulté que le nombre des tours que fait le moulinet dans un temps donné est proportionnel à la vitesse de l'eau, de sorte qu'il suffira de connaître le nombre de tours qu'il fait lorsque la vitesse de l'eau a une valeur déterminée, pour qu'on en conclure tout de suite la vitesse du courant qui lui aura fait faire un autre nombre de tours pendant le même temps. Si, par exemple, on sait que le moulinet fait 8 tours dans une seconde, et que la vitesse de l'eau est de 4^m par seconde, et que dans une autre expérience on ait trouvé que le moulinet faisait 20 tours dans une seconde, on en conclura que la vitesse de l'eau qui le mettait en mouvement était de 2^m,5 par seconde.

La rapidité avec laquelle le moulinet tourne sous l'action d'un courant dont la vitesse est de 4^m par seconde dépend de ses dimensions et de la disposition de ses ailettes. Pour connaître le nombre de tours qu'il ferait dans une seconde s'il était plongé dans un courant, il faut faire une expérience préalable ; cette expérience se fait soit en plaçant l'appareil dans un courant dont on connaît la vitesse, soit en le transportant lui-même avec une vitesse donnée par le tirage d'une masse d'eau immobile.

144. Le moulinet de Woltmann permet de déterminer la vitesse de l'eau dans une rivière, à une profondeur quelconque au-dessous de la surface. Mais si l'on veut se contenter de mesurer la vitesse à la surface même, on peut employer un moyen plus simple. Il suffit en effet, de se servir d'un corps qu'on fera flotter sur l'eau, et on pourra facilement observer le mouvement. On fera en sorte que le flotteur ne sorte presque pas de l'eau, afin qu'il ne soit pas gêné par la résistance de l'air, et il prendra sensiblement la même vitesse que l'eau, surtout si sa masse est faible. On se sert avec avantage pour cela de pains à cacheter, qui remplissent très bien les conditions précédentes.

Si le courant présente de la régularité dans une certaine longueur, le flotteur sera animé dans toute cette longueur d'un mouvement uniforme, et il suffira de déterminer le nombre de secondes qu'il emploie à parcourir une distance connue, pour en conclure sa vitesse. A cet effet on fixera d'avance, à l'aide de jalons, ou par

tout autre moyen, deux alignements dirigés perpendiculairement à l'axe de la rivière, et l'on mesurera la distance entre ces alignements; puis on observera le moment où le flotteur, qui mis dans l'eau un peu plus haut, viendra passer dans la distance de chacun d'eux. Si l'on n'avait pas de montre à second pour mesurer le temps que le flotteur emploie à se rendre d'un alignement au second, on pourrait se servir d'un pendule ordinaire, ainsi que nous l'avons indiqué précédemment (§ 314).

§ 315. On peut employer différents moyens pour avoir la vitesse d'un cours d'eau telle que nous l'avons définie (§ 309), c'est-à-dire la vitesse que devrait avoir toute la masse liquide si elle se mouvait tout d'une pièce, pour que le débit du cours restât le même. Nous nous contenterons d'indiquer le plus simple, qui consiste à déduire la vitesse moyenne du cours d'eau de la vitesse observée à sa surface à l'aide d'un flotteur. On peut servir pour cela du tableau suivant, qui donne la vitesse moyenne correspondant à diverses valeurs de la vitesse à la surface. Ce tableau résulte d'expériences faites par Dubuat; et quoiqu'elles aient été faites en petit, on a reconnu que les résultats qu'il a trouvés peuvent être appliqués, sans grande erreur, à la détermination de la vitesse moyenne d'un grand cours d'eau.

| VITESSE
à la surface. | VITESSE
moyenne. | VITESSE
à la surface | VITESSE
moyenne. |
|--------------------------|---------------------|-------------------------|---------------------|
| 0,20 | 0,45 | 2,20 | 1,65 |
| 0,40 | 0,34 | 2,40 | 1,75 |
| 0,60 | 0,47 | 2,60 | 1,85 |
| 0,80 | 0,64 | 2,80 | 1,95 |
| 1,00 | 0,81 | 3,00 | 2,05 |
| 1,20 | 0,98 | 3,20 | 2,15 |
| 1,40 | 1,16 | 3,40 | 2,25 |
| 1,60 | 1,34 | 3,60 | 2,35 |
| 1,80 | 1,52 | 3,80 | 2,45 |
| 2,00 | 1,70 | 4,00 | 2,55 |

La vitesse de la Seine, aux environs de Paris, est de 0^m,65. Les vitesses du Rhône et du Rhin sont d'environ 1^m,65 et 1^m,80. Les vitesses du Danube s'élèvent même à 4^m dans les fortes crues.

§ 316. Jaugeage d'un cours d'eau. — Le moyen le plus simple pour mesurer la vitesse d'un cours d'eau, est de se servir d'un flotteur.

On puisse employer pour jauger un cours d'eau, c'est-à-dire mesurer la quantité d'eau qu'il fournit en une seconde, consiste à multiplier la surface de la section transversale de la masse liquide par la vitesse moyenne qu'elle possède dans le voisinage de cette section (§ 309).

On vient de voir comment on détermine la vitesse dont on a besoin. Quant à la détermination de la surface de la section transversale du cours d'eau, elle s'effectuera sans peine, à l'aide de sondes qu'on fera pour connaître la profondeur de l'eau en plusieurs points situés dans une direction perpendiculaire au courant. Si l'on trouve que la profondeur est la même dans toute la largeur d'un cours d'eau, dont les bords sont escarpés, on en conclura que la section transversale de l'eau est un rectangle; et l'on trouvera sa surface en multipliant la largeur de la rivière par la profondeur de l'eau. Si, au contraire, comme cela arrive généralement, on reconnaît que la profondeur varie, suivant qu'on s'éloigne plus ou moins des bords, on fera des sondages régulièrement espacés dans toute la largeur de la rivière: on les fera, par exemple, de mètre en mètre. On regardera ensuite la portion de la section transversale comprise entre deux profondeurs consécutives qu'on aura mesurées, comme étant un trapèze qui aurait pour bases parallèles ces deux profondeurs, et pour hauteur la distance horizontale des points où les deux profondeurs ont été prises. En faisant la somme des surfaces des différents trapèzes ainsi obtenus, on aura la surface totale de la section.

Si l'on trouve, par exemple, que, dans un cours d'eau d'une largeur de 8^m, la profondeur est partout de 4^m,6, on en conclura que la surface d'une section transversale est de 42,8 mètres carrés: et si la vitesse moyenne de l'eau est de 4^m,5, on trouvera que le débit du cours d'eau est de 49,2 mètres cubes par seconde.

Un cours d'eau peut être classé parmi les rivières, lorsque, dans l'état ordinaire, il débite de 40 à 42 mètres cubes d'eau par seconde. Lorsque le débit s'élève à 30 ou 40 mètres cubes, la rivière est généralement navigable. Lorsque le débit surpasse 400 mètres cubes, le cours d'eau prend place parmi les fleuves. Ainsi, dans les circonstances ordinaires, la Seine, à Paris, débite environ 400 mètres cubes d'eau par seconde, la Garonne, à Toulouse, en débite environ 150 mètres cubes: et le Rhône, à Lyon, plus de 600 mètres cubes. D'ailleurs la quantité d'eau que fournit un cours d'eau varie beaucoup d'une époque à une autre. Ainsi on a vu la quantité d'eau, débitée par le Rhône, à Lyon, s'abaisser jusqu'à 200 mètres cubes, tandis que, le 12 février 1815, elle s'est élevée à 5770 mètres cubes.

§ 317. Lorsqu'un barrage a été établi en travers d'un cours d'eau, et que l'eau est obligée de s'élever contre ce barrage, pour couler par-dessus sa crête, on peut en profiter pour jeter les eaux d'eau. Un pareil barrage prend le nom de *déversoir*. Il en existe quelques-uns qui sont installés à demeure, et que l'on a construits par des raisons particulières, telles que le besoin d'élever le niveau de l'eau en amont. Mais on peut aussi construire des déversoirs provisoires, dans le seul but de déterminer plus exactement la quantité d'eau que fournit le cours d'eau, ce moyen n'est évidemment applicable qu'aux cours d'eau de peu d'importance.

L'observation de l'écoulement de l'eau par un déversoir permet de reconnaître que la surface de l'eau s'abaisse très sensiblement d'atteindre le plan vertical qui passe par la crête du barrage (fig. 385). L'épaisseur ab de la lame d'eau n'est guère que la

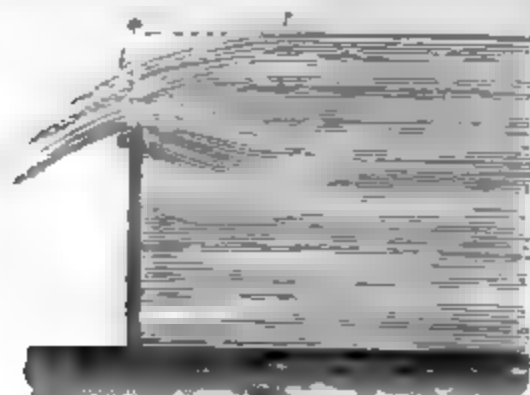


Fig. 385.

de la hauteur ac du déversoir au-dessus de la crête. Il résulte des expériences nombreuses de MM. Bellet et Lesbros que, pour mesurer la quantité d'eau qui passe par un déversoir, en une seconde, on peut, de la manière suivante, évaluer la surface d'un triangle qui aurait pour la longueur du déversoir et pour hauteur la diff

niveau ac ; on multipliera cette surface par la vitesse de l'eau à la hauteur ac (§ 88); enfin on prendra les 0,405 du résultat obtenu.

§ 318. Il arrive très souvent que l'eau d'un cours d'eau s'écoule par l'ouverture d'une vanne; c'est ce qui a lieu, par exemple, lorsque cette eau est employée comme moteur, pour faire mouvoir une roue hydraulique. La vanne consiste en une paroi rectangulaire verticale ou oblique, qui est placée en travers d'un cours d'eau pour arrêter le liquide, et qui peut se lever plus ou moins, de manière à laisser au-dessous d'elle une ouverture rectangulaire par laquelle l'eau s'écoule. La veine liquide qui traverse un pareil orifice subit une forte contraction, dont l'intensité varie d'ailleurs avec les dimensions de l'orifice, et aussi avec la hauteur du niveau dans le bief supérieur au-dessus de cet orifice. MM. Bellet et Lesbros ont fait également des expériences nombreuses sur

de ce genre ; il résulte de ce qu'ils ont trouvé que, dans les tances ordinaires, lorsque la levée de la vanne est d'au moins mètre, on obtiendra assez exactement la quantité d'eau qui a une seconde, en opérant de la manière suivante. On déterminera la surface de l'ouverture par laquelle l'eau s'écoule, en cette surface dans un plan perpendiculaire à la direction des filets liquides ; on la multipliera par la vitesse due à sur du niveau du liquide dans le bief au-dessus du centre de d'écoulement ; enfin on prendra les 0,60 du résultat.

9. Écoulement d'un gaz par un orifice. — Lorsqu'un gaz tenu dans une enveloppe fermée, et qu'on vient à pratiquer une ouverture dans cette enveloppe, le gaz tend à sortir en vertu de sa force élastique. Si l'espace qui existe à l'extérieur, dans l'image de cette ouverture, contient lui-même un gaz ayant la même force élastique, le gaz intérieur ne pourra pas sortir ; il sera maintenu dans son enveloppe par la résistance du gaz extérieur et les choses se passeront de la même manière que si cette enveloppe n'avait pas été percée d'un trou. C'est ce qui arrivera, par exemple, pour une masse de gaz renfermée, sous la pression atmosphérique, dans une capacité qui est elle-même placée au milieu de l'atmosphère. Mais si l'espace, dans lequel le gaz intérieur peut se rendre en sortant par l'orifice qui lui est offert, se trouve vide de toute matière, ou bien s'il contient un gaz ayant une force élastique moindre que celle du gaz intérieur, il y aura écoulement du gaz intérieur par l'orifice. Cet écoulement se produira avec une vitesse d'autant plus grande que l'excès de la pression intérieure sur la pression extérieure sera plus considérable.

Pour trouver la vitesse d'écoulement d'un gaz par un orifice, que nous supposerons percé en mince paroi, nous pouvons assimiler ce gaz à un liquide. Concevons pour cela qu'un liquide ait la même densité que le gaz qui s'écoule, cette densité étant prise à l'intérieur de la capacité qui renferme ce gaz, au niveau de l'orifice d'écoulement. Concevons de plus qu'un pareil liquide soit introduit dans un vase ouvert par le haut, jusqu'à une hauteur telle que la pression qui en résultera, au niveau de l'orifice par lequel il doit s'écouler, soit égale à l'excès de la pression du gaz intérieur sur celle du gaz extérieur. Ce liquide ayant la même densité que notre gaz, dans l'image de l'orifice d'écoulement, et y étant soumis à la même pression, devra s'écouler avec la même vitesse que le gaz. Mais la hauteur que prend le liquide est celle qui est due à la hauteur de la surface libre dans le vase au-dessus de l'orifice (§ 88), ce sera également avec cette vitesse que le gaz s'écoulera.

En appliquant ceci à un exemple, on verra bien de quelle manière la vitesse d'écoulement d'un gaz pourra être déterminée dans chaque cas. Supposons qu'une capacité fermée contienne de l'air dont la force élastique est mesurée par une colonne de mercure de $0^{\text{m}},77$; que cet air se trouve à la température de 0° , et que la pression atmosphérique, à l'extérieur de la capacité qui le contient, soit de $0^{\text{m}},76$. Si l'on pratique une petite ouverture en son paroi dans l'enveloppe, l'air s'écoulera par cette ouverture en vertu de l'excès de la pression intérieure sur la pression extérieure, excès qui est mesuré par une colonne de mercure de $0^{\text{m}},01$. La densité de l'air, à la température de 0° , et sous la pression de $0^{\text{m}},76$ est 770 fois plus petite que celle de l'eau, et par conséquent 4036 fois plus petite que celle du mercure. L'air que nous avons à considérer ici étant sous la pression de $0^{\text{m}},77$, sa densité est un peu plus grande: d'après la loi de Mariotte (§ 249), cette densité est seulement 40336 fois plus petite que celle du mercure. Pour qu'un liquide de même densité, placé dans un vase ouvert par le haut, exerce au niveau de l'orifice par lequel il s'écoule, une pression mesurée par $0^{\text{m}},01$ de mercure, il faut que sa surface libre soit située à $403^{\text{m}},36$ au-dessus de l'orifice. Sa vitesse d'écoulement sera donc de 45^{m} par seconde, c'est en même temps la vitesse d'écoulement de l'air que nous considérons.

On voit par cet exemple qu'un excès de pression très faible détermine une vitesse d'écoulement considérable. Cela tient à la petitesse de la masse de gaz qui est mise en mouvement par cet excès de pression (§ 94). On voit également que, pour un même excès de pression de l'intérieur à l'extérieur, la vitesse d'écoulement doit varier avec la nature du gaz, et aussi avec sa température, puisque cette vitesse dépend de la densité que possède le gaz avant de sortir de la capacité qui le renferme.

§ 320 La quantité de gaz qui passe par l'orifice dans un temps donné peut s'évaluer comme on l'a fait pour un liquide (§ 287). Si l'on admet que les molécules gazeuses traversent l'orifice en se mouvant perpendiculairement à sa surface, on trouvera le volume du gaz écoulé en une seconde en multipliant la surface de l'orifice par la vitesse d'écoulement. Le volume ainsi obtenu est celui qu'occuperait le gaz après sa sortie de l'orifice, s'il conservait la même densité qu'il avait à l'intérieur du réservoir; et comme le gaz se dilate en sortant, en raison de la diminution de pression qu'il supporte, il en résulte qu'on devra augmenter le volume trouvé, dans le rapport dans lequel la force élastique du gaz a diminué, afin d'obtenir le volume qu'il occupe réellement après sa sortie.

En déterminant par l'expérience la quantité de gaz qui s'écoule en une seconde par un orifice percé en mince paroi, on trouve que cette quantité est beaucoup plus petite que celle qui résulte des considérations précédentes : la *dépense effective* n'est que les 0,65 de la *dépense théorique*. La différence que l'on trouve ainsi, entre le résultat indiqué par la théorie et celui que fournit l'expérience, est encore due ici à ce que nous avons commis une erreur en admettant que les molécules gazeuses traversent l'orifice perpendiculairement à sa surface. La veine gazeuse se contracte au delà de l'orifice, de même qu'une veine liquide. C'est ce qu'on peut vérifier très facilement en chargeant l'air de fumée, ce qui rend la veine gazeuse visible, et permet d'en observer la configuration. La contraction de la veine gazeuse est un peu moins forte que celle qu'éprouve la veine liquide dans les mêmes conditions ; puisque la dépense effective est les 0,65 de la dépense théorique, dans le cas d'un gaz, et qu'elle n'en est que les 0,62, dans le cas d'un liquide.

En adaptant un ajutage à l'orifice d'écoulement d'un gaz, on modifie considérablement les conditions de l'écoulement, et ces modifications s'expliquent exactement de la même manière que dans le cas d'un liquide. Avec un ajutage cylindrique, on obtient une dépense effective qui est les 0,93 de la dépense théorique. Quand on emploie un ajutage légèrement conique et convergent, la dépense effective devient les 0,94 de la dépense théorique évaluée à l'aide de l'orifice de sortie de l'ajutage.

§ 324. **Mouvement des gaz dans des tuyaux.** — Lorsqu'un gaz se meut à l'intérieur d'un tuyau, il éprouve de la part des parois une résistance analogue à celle dont nous avons parlé pour les liquides (§ 298). Cette résistance est proportionnelle à l'étendue de la surface contre laquelle le gaz glisse. Elle varie aussi avec la vitesse du gaz : mais contrairement à ce qui a lieu dans le cas d'un liquide (§ 304), on peut la regarder comme étant proportionnelle au carré de la vitesse du gaz. Cette loi, qui lie la résistance des parois du tuyau à la vitesse du gaz, a été reconnue exacte pour toutes les vitesses que l'air prend habituellement dans les tuyaux de conduite, vitesses qui sont comprises entre 3^m et 50^m par seconde.

La présence des coudes et des étranglements, dans les tuyaux que parcourt un gaz, occasionne une grande résistance à son mouvement. C'est pour produire une pareille résistance, et par suite modérer la vitesse du gaz, qu'on place dans les tuyaux de poêle une clef, ou soupape à gorge, telle que celle qui est représentée par la fig. 380 (page 444).

462 PRINCIPES RELATIFS AU MOUVEMENT DES FLUIDES.

§ 322. Le gaz qui sert à l'éclairage dans les villes est introduit d'abord à l'intérieur de grands réservoirs, auxquels on donne le nom de *gazomètres*, et de là il se rend aux différents becs où il brûle, en passant par des tuyaux qui sont établis sous le pavé des rues. Un gazomètre n'est autre chose qu'une cloche de tôle, fig. 386, qui est plongée dans une grande fosse contenant de l'eau. 1

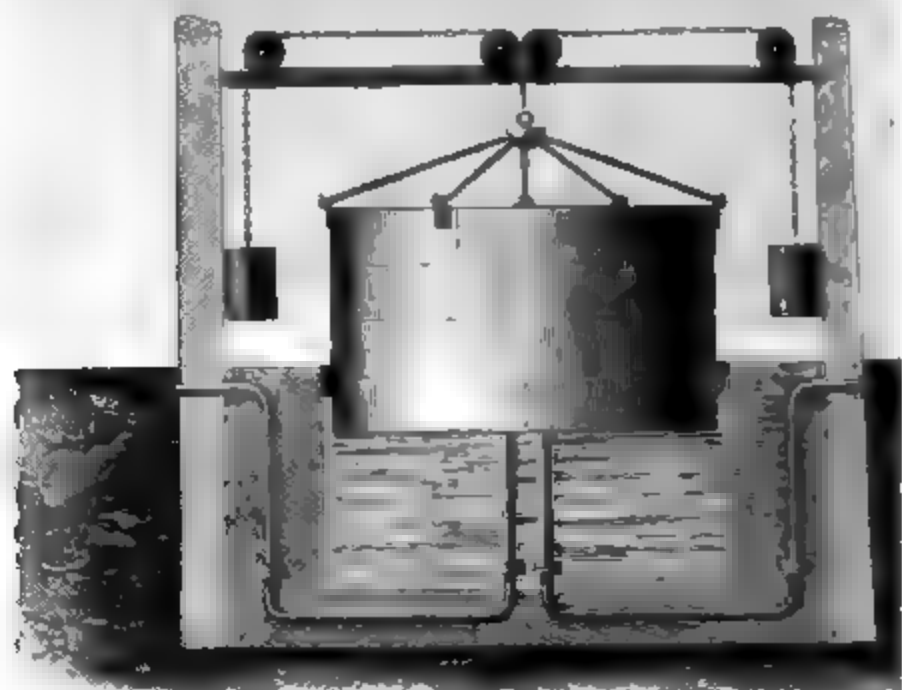


Fig. 386.

est amené sous cette cloche, à mesure de sa fabrication, par un tuyau qui arrive au fond de la fosse, et qui se relève verticalement pour se terminer au-dessus du niveau que peut atteindre le gaz; le gaz ne peut s'échapper au dehors; il est maintenu latéral et à sa partie supérieure par la paroi cylindrique et le fond de la cloche, et à sa partie inférieure par l'eau de la fosse avec laquelle il est en contact. Le poids de la cloche est en grande partie équilibré par des chaînes fixées à sa partie supérieure, qui passent sur des poulies de renvoi, et se terminent à des contre-poids. La partie restante du poids de la cloche, augmentée du poids du gaz qu'elle contient, est mise en équilibre par la poussée que la cloche éprouve de bas en haut. Cette poussée est due à la fois à l'action de l'eau dans lequel la partie supérieure de la cloche est plongée, et à l'action de l'eau de la fosse, dont le niveau est plus bas à l'intérieur de la cloche qu'à l'extérieur.

Les contre-poids, qui équilibrent une partie du poids de la

déterminés de manière que la différence de niveau de l'eau à l'intérieur et à l'extérieur de la cloche, ne soit que quelques centimètres. En vertu de cette différence de niveau, le gaz dans la cloche est un peu plus pressé que l'air atmosphérique environnant, et c'est ce qui l'oblige à sortir par un second tuyau placé à l'intérieur comme le premier par lequel il avait été introduit. De là le gaz se répartit entre les divers tuyaux qui ont été destinés pour le conduire aux orifices par lesquels il doit s'écouler en brûlant. L'excès de la pression du gaz dans le gazomètre sur celle de l'air atmosphérique, tout en étant très faible, suffit à produire une grande vitesse d'écoulement par chaque orifice, les tuyaux n'exerçant pas une grande résistance au mouvement du gaz ; cet excès de pression est en réalité presque entièrement employé à vaincre cette résistance, et la vitesse d'écoulement ne dépend que d'une très faible portion de cette puissance qui reste disponible, après que les frottements contre les tuyaux ont été vaincus. Pour modérer la vitesse avec laquelle le gaz sort par un orifice, on tourne, d'une quantité plus ou moins grande, le robinet qui est adapté au tuyau près de ce bec ; on produit par là un étranglement qui diminue la vitesse, en augmentant les résistances qui s'opposent au mouvement du gaz.

Mesure de la vitesse d'un courant d'air. — Nous avons indiqué sommairement (§ 264) les principales causes qui déterminent les mouvements de l'air atmosphérique, ou ce que l'on appelle les vents. Nous avons vu ensuite (§§ 265 et 266) comment les différences de températures produisent des courants d'air à l'intérieur des maisons et dans les cheminées. Dans d'autres circonstances, l'air est mis en mouvement par des machines spéciales, dont nous nous occuperons plus tard. De quelque manière que se produise un courant d'air, il est souvent utile de mesurer sa vitesse. On y parvient au moyen de l'anémomètre de M. Combes. C'est un instrument analogue au moulinet de Woltmann représenté par la fig. 384 (page 453), mais construit avec une très grande légèreté, et approprié à son usage spécial auquel il est destiné. L'emploi de cet instrument est entièrement pareil à celui du moulinet. Le tableau suivant indique la vitesse que possèdent les molécules dans les diverses espèces de vents.

DÉSIGNATION DES VENTS.

| | |
|--|--|
| Vent ordinairement sensible | |
| Vent faible | |
| Vent frais ou brise (tient bien les voiles) | |
| Vent le plus convenable aux manœuvres | |
| Brise fraîche très bon pour la marche en mer | |
| Grand frais fait servir les hautes voiles | |
| Vent très fort | |
| Vent impétueux | |
| Grosse tempête | |
| Ouragan | |
| Ouragan qui renverse les édifices | |

§ 326 Pression exercée par une veine liquide sur une surface. — Lorsqu'une veine liquide vient rencontrer une

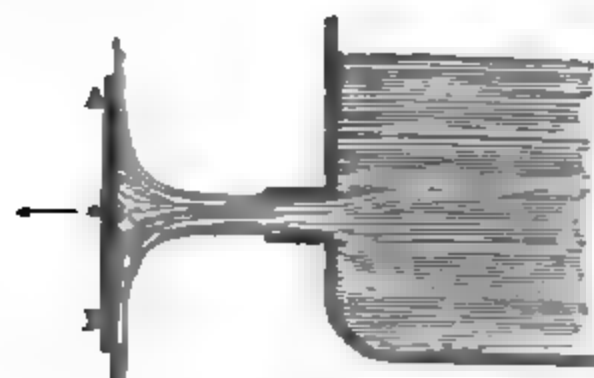


Fig. 387.

Fig. 387, qui s'continue ment, elle s'étale sur la surface, et en lui fait supporte sion. Admettons qu'il s'agisse d'un plane disposée parallèlement à la direction du liquide. Les dimensions de la surface ont une influence sur la grandeur

sion qu'elle supporte. On conçoit en effet que cette pression de la réaction des filets liquides qui sont obligés de changer de direction, sera d'autant plus forte que le mouvement de ce jet a été plus grandement modifié. Or, si la surface rencontrée n'est pas plus large que la veine, les filets liquides se débarrassent bien pour passer tout autour d'elle: mais leur direction est changée autant que si la surface était plus grande. A mesure que la surface sera plus étendue, la direction des filets liquides s'écartera de plus en plus de sa direction primitive; et c'est lorsque ce parallélisme sera complètement obtenu qu'on atteindra la pression maximum que la veine puisse exercer sur cette surface. L'expérience a démontré que, pour arriver à ce résultat, il faut que la sur

5 à 8 fois plus grande que la section transversale de la

rant la pression exercée sur la surface, ce qui peut se
e d'un ressort contre lequel cette surface s'appuierait,
qu'elle pouvait être représentée par le poids d'un cy-
quide ayant pour base la section de la veine, et pour
double de la hauteur de chute qui donnerait lieu à la
possède cette veine. Si l'on observe de plus que la hau-
ute qui produit une certaine vitesse est proportionnelle
cette vitesse (§ 87), on pourra dire que la pression
une veine liquide sur une surface plane, perpendiculaire
ion et suffisamment large, est : 1° proportionnelle à la
la veine ; 2° proportionnelle au carré de la vitesse des
liquides qui la composent.

se rendre compte de ce résultat d'une manière très
abord, à égalité de vitesse de la veine liquide, il est bien
a pression supportée par la surface doit être proportion-
ombre des molécules qui viennent la rencontrer dans un
né, et par conséquent proportionnelle à la section de la
second lieu, si deux veines de même section transversale
les de vitesses différentes, dont l'une sera par exemple
l'autre, la pression exercée par la première sera quatre
rande que celle exercée par la seconde ; car, d'une part,
écule ayant une vitesse double, produit individuelle-
action deux fois plus grande ; et, d'une autre part, il
la surface deux fois plus de molécules dans le même

Si la surface contre laquelle vient tomber la veine liquide
plane, la pression qu'elle a à supporter dépend de sa
te pression sera plus ou moins grande suivant que la sur-
ra les filets liquides à changer plus ou moins de direc-
surface est convexe, les filets liquides seront moins for-
ournés qu'ils ne le seraient par une surface plane ; aussi
exercée sera-t-elle moins forte que celle qui correspond
ace plane. Si, au contraire, la surface rencontrée par la
de est concave, la pression sera plus grande que dans le
surface plane.

exemple, la veine vient frapper au centre d'un héli-
aux, fig. 388, les filets liquides s'échapperont, tout autour
de cet hémisphère, avec des vitesses égales et contraires
ils avaient avant d'atteindre la surface. Chacun de ces
zera d'abord de direction jusqu'à devenir perpendiculaire

466 PRINCIPES RELATIFS AU MOUVEMENT DES FLUIDES
à sa direction primitive, comme s'il avait rencontré une
plane. Mais ce changement de direction ne s'arrêtera



Fig. 388.



Fig. 389.

il continuera
produire jus-
que le filot
parallèle à
la veine, en
vant en ar-
rière, et, d
seconde p
réagira sur
face soit
dans la p
La pressio
supportée
hémisphère
devra donc
ble de celle
rait suppo
surface p
cevant per-
lairement
de la même
L'expérience
firme ce r
la théorie

§ 326. Lorsqu'une veine liquide vient frapper une sur-
face AB, fig. 389, qui se présente obliquement à sa direction
la pression qu'elle exerce sur cette surface n'est plus la même
qu'elle avait rencontrée perpendiculairement. La vitesse CD de
la veine peut être regardée comme résultant de la compo-
sition de deux vitesses CE, CF (§ 403), dont l'une soit perpendi-
culaire au plan AB, et l'autre lui soit parallèle. En vertu de la vite-
sse CE la veine liquide ne fait que se mouvoir parallèlement au pl-
an AB, qui ne peut donner lieu à aucune pression sur ce plan. La
pression supportée par le plan est donc due uniquement à la v-
itesse CF, elle est la même que si la veine se mouvait perpendicul-
airement au plan AB, avec la vitesse CE, et que sa section transversale
soit la même que la section faite dans notre veine liquide par un plan per-
pendiculaire à sa direction primitive.

§ 327. Si la surface plane que vient rencontrer une ve-
ne est elle-même en mouvement, on arrivera de la même ma-
nière à déterminer la pression qu'elle aura à supporter de

CORPS PLONGÉ DANS UN LIQUIDE EN MOUVEMENT. 467

On observera que le mouvement relatif de la veine liquide par rapport à la surface, qui seul occasionne la pression que cette surface supporte, ne sera nullement modifié si l'on donne un mouvement commun à l'ensemble de la veine liquide et de la surface ; savoir d'où sort la veine liquide et la surface sur laquelle elle se trouvent placés sur un bateau, la pression exercée par la veine sera la même, soit que le bateau soit en repos, soit qu'il aille dans une direction ou dans une autre. On pourra donc dire que l'on donne à la veine liquide ou au plan mobile qu'elle rencontre une vitesse commune égale et contraire à la vitesse du bateau. La pression du liquide sur le plan ne sera nullement changée par là. Mais le plan, se trouvant animé de deux vitesses égales et contraires, sera réduit à l'immobilité ; et le liquide, animé de la vitesse qu'il avait et de celle qu'on vient de lui attribuer, possédera une vitesse unique résultant de la composition de ces deux vitesses (§ 403). On aura donc ainsi ramené la détermination de la pression exercée par une veine liquide sur une surface qui est en mouvement, à celle de la pression qui se produit dans le cas où cette surface est en repos.

Supposons, par exemple, que la surface plane qui reçoit l'action de la veine liquide soit animée d'une vitesse dirigée suivant l'axe de la veine, et dans le sens du mouvement du liquide ; ou, en d'autres termes, que cette surface aille, pour ainsi dire, devant elle. La vitesse des molécules liquides devra être plus grande que celle du plan ; sans quoi il n'y aurait pas de pression produite. Appliquant ce qui vient d'être dit en général, on trouvera que la pression supportée par le plan est la même que si ce plan était immobile, et que la veine liquide ne fût animée que de la différence de sa vitesse propre et celle du plan.

Le plan se mouvait toujours dans la direction de l'axe de la veine, mais en sens contraire du mouvement de la veine, la pression qu'il subirait serait la même qu'il était immobile, et la veine liquide posséderait une vitesse égale à la somme de sa vitesse propre et de celle du plan.

1. *Pression supportée par un corps plongé*

dans un liquide en mouvement. — Lorsqu'un plan AB,

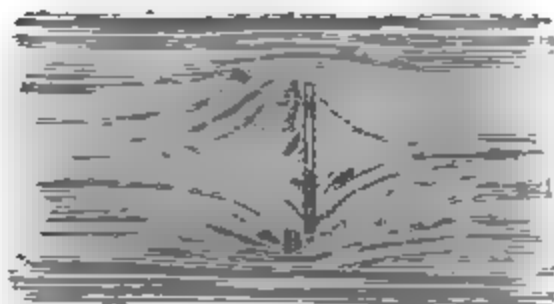


Fig. 390.



la présence du plan.

Un corps de forme quelconque, plongé dans un et maintenu immobile dans ce courant, éprouve une pression due aux deux causes dont il vient d'être parlé. Cette pression totale varie beaucoup suivant la forme de la partie antérieure du corps, celle qui est directement à l'action des filets liquides, et aussi la partie postérieure, le voisinage de laquelle se produisent les remous dont il a été parlé.

L'expérience indique que, pour un même corps, la pression qu'il éprouve est proportionnelle au carré de la vitesse du liquide. Pour une même vitesse du liquide et des corps de formes différentes, cette pression est proportionnelle à l'étendue de la section transversale du corps. Si un corps n'est pas entièrement dans la masse liquide, si c'est par exemple un corps flottant, on devra considérer évidemment que la partie de ce corps qui est au-dessous de la surface du liquide.

Pour une même vitesse du liquide et une même section transversale du corps plongé, la pression exercée par le liquide est d'autant plus faible que la partie antérieure et postérieure du corps présentent des surfaces plus obliques à la direction des filets liquides : cette pression est augmentée par les parties anguleuses de ces surfaces, car les filets liquides sont obligés de se mouvoir

Si, par exemple, le corps se meut dans la même direction que le liquide, soit dans le même sens, soit en sens contraire, la pression qu'il supportera sera la même que s'il était en repos, et que le liquide fût animé d'une vitesse égale à la différence ou à la somme de la vitesse propre et de la vitesse du corps.

Lorsqu'un corps se meut dans un liquide en repos, il éprouve la même pression que s'il était immobile au milieu du liquide, et celui-ci fût animé d'un mouvement égal et contraire à celui qu'il possède le corps. C'est cette pression, éprouvée par un corps qui se déplace dans un liquide, qui constitue la résistance dont nous avons parlé précédemment (§ 429), et dont nous avons indiqué sommairement les lois.

La force qui doit être appliquée à un navire, pour entretenir son mouvement, n'a à vaincre que la résistance opposée par l'eau dans laquelle il se meut, ainsi que celle qui est occasionnée par l'air. Cette dernière est beaucoup plus faible. Pour diminuer la grandeur de la force motrice correspondante à une vitesse donnée, ou bien encore pour augmenter la vitesse qu'une même force motrice peut produire et entretenir, on a soin de donner aux navires une forme telle, qu'à égalité de volume immergé, la résistance au mouvement soit aussi petite que possible. Cette condition doit se combiner avec celle qui a déjà été énoncée (§ 276) et qui a pour objet la stabilité de l'équilibre. C'est pour atteindre ce but qu'on donne à la proue une forme qui lui permet de fendre facilement les flots, et qu'on arrondit les bords du navire, tant vers la poupe que vers la proue, afin d'éviter l'augmentation de résistance qui résulterait de la présence de parties anguleuses.

Pour faire comprendre combien la forme d'un navire a d'influence sur la résistance que le liquide oppose à son mouvement, il suffit de citer le résultat d'une expérience faite par Bossut. Un modèle de vaisseau de ligne, et un prisme de même longueur qui avait pour base la plus grande section transversale du vaisseau, furent mis en mouvement dans le sens de leur longueur, dans une eau tranquille, et avec le même tirant d'eau; Bossut trouva que l'eau opposait au prisme une résistance 5 fois plus grande qu'au vaisseau.

§ 330. **Pression exercée sur un corps par un gaz en mouvement.** — Une veine gazeuse, qui vient rencontrer une surface fixe ou mobile, exerce sur elle une pression analogue à celle qui est produite dans les mêmes circonstances par une veine liquide. Cette pression est soumise aux mêmes lois (§§ 324 à 327); et il n'y a de différence essentielle que dans son intensité, qui est gé-

néralement beaucoup plus faible que quand il s'agit d'un liquide, en raison du peu de masse de la quantité de gaz qui vient rencontrer la surface dans un temps déterminé.

Un corps qui est plongé au milieu d'une masse gazeuse en mouvement éprouve également une pression analogue à celle qu'il éprouverait si le gaz était remplacé par un liquide aussi en mouvement. Cette pression, qui devient une résistance au mouvement, dans le cas où le corps se meut à l'intérieur d'un gaz en repos, est soumise aux mêmes lois (§§ 328 et 329) que si elle était produite par un liquide.

§ 334. *Résistance de l'air à la chute des corps.* — Nous avons vu (§ 82) que si les corps ne tombent pas tous avec la même vitesse, cela tient à la résistance que l'air atmosphérique oppose à leur mouvement. Il nous est facile maintenant de nous rendre compte de la manière dont cette résistance agit sur les différents corps.

Lorsqu'un corps tombe dans l'air, il est soumis à l'action de deux forces, dont l'une est son poids, et l'autre est la résistance de l'air. Pour des corps de même poids et de surfaces différentes, la première force est la même, et la seconde est d'autant plus grande que la surface qui vient directement choquer l'air est plus étendue : donc ces corps tomberont d'autant moins vite qu'ils présenteront à l'air une plus grande surface. Un même corps tombera plus ou moins rapidement, suivant qu'on le tournera de telle ou telle manière : c'est ainsi que la rapidité de la chute d'une feuille de papier sera très différente, suivant qu'on placera ses deux faces horizontalement ou verticalement.

Des corps de même nature et de formes semblables ne tombent pas avec la même rapidité, si leurs grosseurs sont différentes. Si s'agit de deux balles de plomb, dont l'une ait un diamètre double de celui de l'autre, on voit que le poids de la plus grosse des deux est 8 fois plus grand que le poids de la plus petite ; leurs masses sont aussi dans le même rapport ; il faudrait donc que la résistance de l'air fût 8 fois plus grande sur la première balle que sur la seconde pour que leur mouvement fût le même. Mais il n'en est rien. A égalité de vitesse, la résistance que l'air opposera au mouvement de la première balle ne sera que 4 fois plus grande que celle qu'éprouvera la seconde, puisque les surfaces de leurs plus grandes sections transversales sont entre elles dans le rapport de 4 à 1 : donc la plus grosse des deux balles tombera plus vite que l'autre. Ces mêmes considérations font voir pourquoi, en lançant des projectiles de même nature, mais de diverses grosseurs, au moyen d'une arme à feu, on atteint à une distance d'autant

RÉSISTANCE DE L'AIR A LA CHÛTE DES CORPS. 471

plus grande que les projectiles sont plus gros ; la résistance de l'air au mouvement du projectile se fait d'autant moins sentir, que le rapport de sa masse à sa surface est plus considérable.

Quand un corps tombe dans l'air, son mouvement s'accélère, mais pas autant qu'il tomberait dans le vide, en raison de la résistance qu'il éprouve de la part de l'air. À mesure que sa vitesse augmente, la résistance de l'air augmente aussi ; son mouvement accélère donc de moins en moins, puisque l'excès de son poids sur la résistance diminue constamment. On peut même reconnaître que la vitesse du corps ne peut pas dépasser une certaine limite : cette vitesse limite est celle pour laquelle la résistance de l'air est égale au poids du corps. On voit en effet que, si le corps avait à avoir cette vitesse, la force qui tend à accélérer son mouvement serait mise en équilibre par celle qui tend à le retarder, et en conséquence le mouvement resterait uniforme. La vitesse limite dont nous parlons sera d'ailleurs d'autant plus petite que, pour une même masse, le corps présentera une plus grande surface à l'air. C'est par ces considérations qu'on peut se rendre



Fig. 321.



Fig. 322.

de la manière dont fonctionnent les parachutes, à l'aide desquels on peut se laisser tomber d'une grande hauteur, sans qu'il

en résulte le moindre accident. Le parachute est un appareil qui a exactement la forme d'un grand parapluie, et qui supporte à sa partie inférieure un panier dans lequel on peut se placer. Lorsque le parachute est fermé, *fig. 394*, il peut tomber avec une grande vitesse; mais lorsqu'il est ouvert, *fig. 392*, il présente une très grande surface à l'air, et, malgré le poids qu'il supporte, il ne peut prendre qu'une vitesse très modérée. Si le parachute, avant de s'ouvrir, a pris une vitesse un peu grande, cette vitesse diminue aussitôt qu'il vient de s'ouvrir, en raison de la résistance de l'air qui, l'emportant sur le poids total de l'appareil, ralentit son mouvement.

§ 332. **Action du gouvernail dans le mouvement du navire.** — Le gouvernail, que l'on adapte à la poupe d'un navire, a pour objet de donner au mouvement de ce navire telle direction qu'on veut. Ce n'est autre chose qu'une surface plane, inclinée verticalement, et mobile autour d'un de ses côtés verticaux, qui fonctionnent de charnière. Pour faire tourner le gouvernail autour de cette espèce de charnière, on agit sur un long levier qui est placé horizontalement à sa partie supérieure, ou bien sur une roue verticale, munie de poignées sur tout son contour, qui est placée sur le pont du navire, et dont le mouvement de rotation se communique au gouvernail.

Admettons que le liquide sur lequel se meut le navire soit en repos, que la force qui est appliquée à ce navire tende à le faire mouvoir dans le sens de sa longueur, et que son mouvement s'effectue dans ce sens pendant un certain temps, sans changer de direction. On devra placer le gouvernail de manière que ses faces soient dans la direction même de l'axe du navire, et par conséquent du mouvement dont il est animé. Mais, si l'on veut qu'à un moment donné le navire prenne une autre route, que sa poupe dirige, par exemple, à droite du point vers lequel elle était dirigée jusque-là, on fera tourner le gouvernail de ce même côté, *fig.*

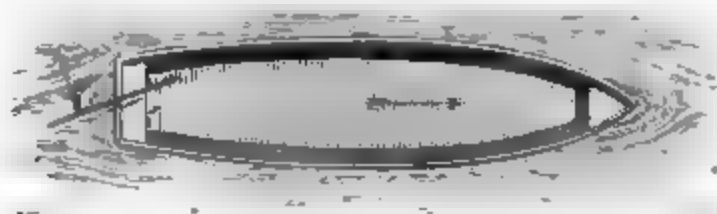


Fig. 393.

Le mouvement du navire se continuant comme il avait lieu à l'instant d'au paravant, le gouvernail éprouvera de la part de

une pression perpendiculaire à sa surface, pression qu'il n'éprou-
 vait pas avant qu'on lui eût donné sa nouvelle position. Cette
 pression agit sur le navire avec lequel le gouvernail fait corps, et
 l'oblige à tourner dans le sens voulu. Lorsque l'axe du navire a été
 amené dans la nouvelle direction qu'il doit prendre, on replace
 le gouvernail comme il était précédemment, et le mouvement s'ef-
 fectue en ligne droite, jusqu'à ce qu'on agisse de nouveau sur le
 gouvernail.

Le mouvement d'un navire a souvent lieu dans des conditions
 moins simples que celles que nous venons de supposer. La force
 qui le fait mouvoir n'agit pas toujours dans le sens du mouvement
 qu'on veut lui donner; c'est ce qui a lieu la plupart du temps, par
 exemple, lorsque le navire est poussé par le vent. De même le
 liquide dans lequel s'effectue le mouvement est souvent animé lui-
 même d'une certaine vitesse, dont la direction est différente de celle
 que doit prendre le navire; il en résulte que la résistance, que le
 liquide oppose au mouvement du navire n'agit pas suivant son axe.
 Si le navire, dans de telles conditions, n'avait pas de gouvernail,
 il se déplacerait en ne suivant généralement pas le chemin qu'on
 veut lui faire suivre. A l'aide du gouvernail, en le faisant tourner,
 soit d'un côté, soit de l'autre, on développe une nouvelle force pro-
 venant de la pression qu'il supporte de la part du liquide; et l'on
 fait en sorte que cette nouvelle force, en se combinant avec celles
 dont nous venons de parler, donne au navire le mouvement qu'on
 veut lui faire prendre.

Le gouvernail d'un navire n'est qu'une imitation de la queue des
 poissons, qui leur sert à se diriger à volonté d'un côté ou d'un autre;
 il leur suffit pour cela de la dévier de sa position naturelle, en la
 portant un peu à droite ou à gauche.

**§ 333. Propulsion des navires à l'aide de rames, de
 rames, ou d'hélices.** — Les rames, dont on se sert pour produire
 et entretenir le mouvement d'un bateau, sont des leviers droits
 ayant leur point d'appui sur les bords du bateau. L'une des extré-
 mités de chaque rame plonge dans l'eau, tandis qu'un homme assis
 dans le bateau, le dos tourné à la proue, tire l'autre extrémité vers
 lui. En agissant ainsi sur la rame, il la fait tourner autour de son
 point d'appui, et par suite l'extrémité qui plonge dans l'eau s'y met
 en mouvement, en allant de la proue à la poupe. Ce mouvement de la
 rame développe une résistance de la part du liquide: cette résistance
 est une force qui lui est appliquée, et qui est dirigée en sens contraire
 de son mouvement, c'est-à-dire de la poupe à la proue. La rame
 se trouve ainsi soumise à l'action de deux forces parallèles et



piens contre le bateau, de manière à lui appliquer
égale et contraire à cette force de traction ; la force
la contraction de ses muscles fait que son corps for
un ressort qui aurait été comprimé, et qui, en che
tendre, exercerait des pressions égales et contrair
avec lesquels il serait en contact par ses extrémit
l'homme sur la rame détermine bien, au point où elle
le bateau, une pression égale à la résultante dont r
il n'y a qu'un instant ; mais elle donne lieu en mé
pression en sens contraire, exercée par ses pieds. L
bateau n'est soumis qu'à la différence de ces de
rence qui est précisément égale à la pression que l
de la part du liquide dans lequel elle se meut : c
seule qui tend à accélérer le mouvement du bateau

Ce résultat auquel nous venons d'arriver s'obtie
médiatement, si l'on ne s'inquiète pas de savoir co
est liée au bateau, ni par quel moyen elle est mise
La résistance que l'eau lui oppose est évidemment
extérieure qui agisse sur le bateau, et qui puisse
comme étant la force motrice tendant à augmenter

Lorsqu'une rame a tourné d'une certaine quanti
point d'appui, elle ne se trouve plus dans une posi
pour continuer son action. Alors l'homme qui la mu

DES NAVIRES A L'AIDE DE RAMES, ETC. 475

elle est plongée dans l'eau ; dans le second, elle est se meut dans l'air.

ue la rame éprouve de la part de l'eau est d'autant qu'elle rencontre le liquide sous une plus grande une plus grande vitesse. C'est afin de ne pas avoir une vitesse trop considérable, pour produire une action le bateau, qu'on élargit la partie qui doit plonger et lui conservant que l'épaisseur nécessaire à sa so- it, par cet accroissement de surface, le même effet se produit par une augmentation de la vitesse ; mais la rame en est rendue plus facile.

Le bateau marche convenablement, à l'aide de rames, ait un nombre pair qui agissent, moitié d'un côté, et. Sans cela, les impulsions que le liquide transmet l'intermédiaire des diverses rames, donneraient lieu qui serait trop éloignée d'être dirigée suivant son rait constamment à se détourner de sa route, par oblique de cette résultante.

faire marcher un bateau de grande dimension au t, il faudrait en employer un grand nombre, ce qui inconvénients de plus d'un genre, surtout pour des longs. Dans ce cas, on remplace les rames par des , fig. 394, auxquelles on donne un mouvement de

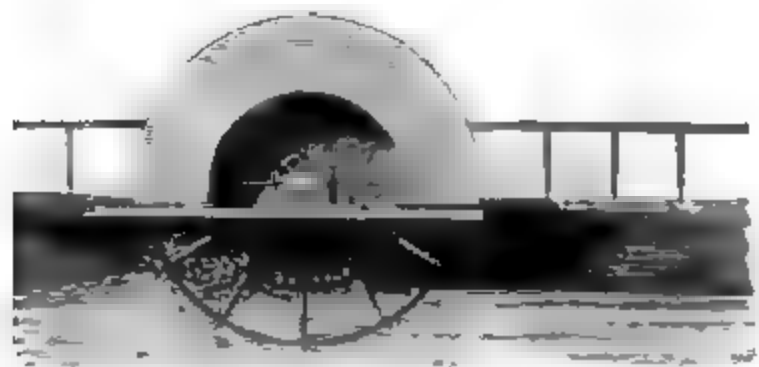


Fig. 394.

ren d'une machine à vapeur : c'est ce qui constitue vapeur. Les roues sont au nombre de deux, une de bateau ; elles sont montées aux deux extrémités zontal, qui traverse le bateau perpendiculairement et qui reçoit un mouvement de rotation de la machine. Les palettes de ces roues fonctionnent absolument nes. Lorsqu'elles sont à la partie inférieure de la

circonférence qu'elles décrivent, elles plongent dans l'eau, et marchent de la proue vers la poupe; elles sortent ensuite de l'eau, et se meuvent dans l'air en sens contraire, pour revenir plonger dans l'eau, et s'y mouvoir de la même manière que précédemment. C'est la pression que l'eau exerce sur les palettes immergées qui constitue la force motrice appliquée au bateau, et tendant à accélérer sa vitesse.

§ 335. Depuis quelques années, on s'est beaucoup occupé de remplacer les roues des bateaux à vapeur par des hélices. Nous nous rendons compte du mode d'action de ces hélices, auxquelles on a donné des formes très diverses, imaginons qu'un bateau est muni d'une vis, dont l'axe, placé horizontalement, soit dirigé dans le sens de la longueur du bateau; concevons de plus que cette vis, ne pouvant tourner autour de son axe, dans des collets fixés au bateau, soit engagé dans un écrou solidement maintenu dans une position invariable par rapport au sol environnant. Si l'on fait tourner l'écrou, elle marchera dans l'écrou, et entrainera le bateau avec elle. L'hélice qu'on adapte à un bateau est une véritable vis, qui fonctionne d'une manière analogue à celle dont nous venons de parler; elle n'y a de différence qu'en ce que l'écrou fixe est remplacé par l'eau dans laquelle l'hélice tourne. Cette eau, qui fait fonction d'écrou, ne reste pas immobile comme l'écrou qu'elle remplace, mais la résistance qu'elle exerce sur les surfaces inclinées de l'hélice communique pas moins au bateau un mouvement de progression, qui est d'autant plus rapide que l'hélice tourne plus vite.

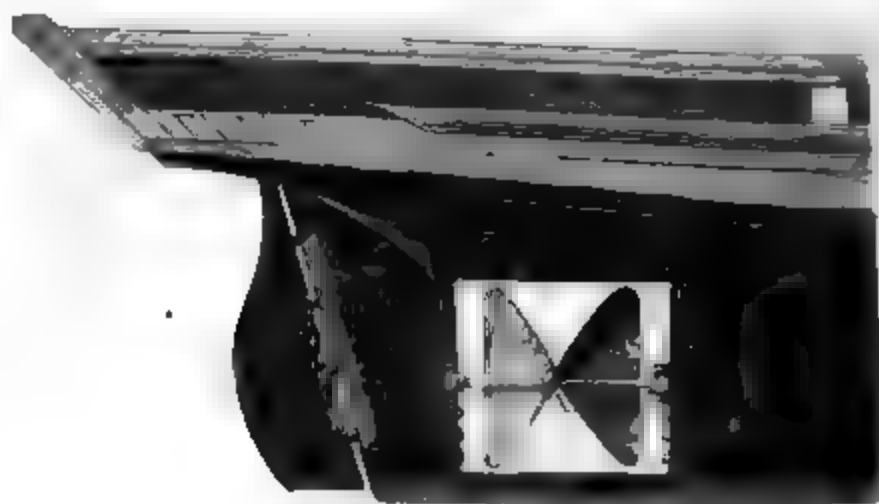


Fig. 395.

L'hélice A, fig. 395, se place à l'arrière du bateau, vers sa queue.

Leure, et dans le plan vertical qui passe par son axe; elle se me ainsi à une petite distance en avant du gouvernail B.

Si l'on fait attention à la manière dont l'hélice est installée, on verra qu'elle doit présenter un avantage sur les roues, pour la navigation sur mer; c'est que son action est toujours très régulière, tandis qu'il n'en est pas de même des roues. Le bateau inclinant, tantôt d'un côté, tantôt de l'autre, les deux roues se trouvent inégalement plongées, et par suite les pressions qu'elles reçoivent de la part de l'eau sont quelquefois très-différentes l'une de l'autre; il en résulte que le bateau tend à se détourner de sa route. L'hélice, au contraire, agit toujours de la même manière. Quelle que soit l'inclinaison que prenne le bateau dans un sens ou dans l'autre; elle lui transmet constamment une pression dirigée dans le sens de son axe.

L'expérience a fait reconnaître en effet que l'emploi de l'hélice, comme moyen de propulsion des navires sur mer, est préférable à l'emploi des roues, toutes les fois que la navigation ne s'effectue que dans les conditions de régularité qui existent dans les temps calmes; et que, même lorsqu'on se trouve dans ces conditions de régularité, l'hélice produit d'aussi bons effets que les roues. Mais l'avantage de l'hélice est compensé en partie par l'inconvénient qui résulte de ce qu'elle doit recevoir un mouvement de rotation extrêmement rapide, ce qui use en très peu de temps les supports sur lesquels tourne son axe.

§ 336. Quand on se sert de rames, de roues, ou d'hélices, pour faire mouvoir un navire, on est obligé de développer une quantité de travail beaucoup plus grande que celle qui est strictement nécessaire en raison des résistances qui s'opposent au mouvement du navire. Pour le reconnaître, il suffit d'observer que ces divers appareils de propulsion ne peuvent recevoir de l'eau la pression moyenne dont on a besoin, qu'autant qu'ils donnent à une certaine masse d'eau un mouvement dirigé en sens contraire de celui qu'ils veulent transmettre au navire. Toute la portion du travail moteur qui est employée à produire ce mouvement de l'eau est en pure perte; et c'est ce qui fait qu'il existe une différence très grande entre le travail moteur total développé par le moteur qui met l'appareil de propulsion en mouvement, et le travail résistant occasionné par les résistances que le navire a à vaincre.

La perte de travail dont il est ici question est due à ce que, pour pousser le navire en avant, on prend son point d'appui sur un corps qui n'est pas fixe, sur l'eau même dans laquelle le navire est plongé. Si l'on pouvait s'appuyer sur des corps fixés au fond de

conséquence, prendre un mouvement en sens contraire la locomotive doit donner au convoi.

Pour faire disparaître la grande perte de travail signalée, on a imaginé un moyen de donner aux bateaux un appui fixe, qui leur permet de marcher, sans trouble, comme à l'ordinaire, une grande masse d'eau en mouvement traînant de leur mouvement propre. Ce moyen, qui n'a été employé avec avantage que dans un petit nombre de cas, consiste à installer au fond de l'eau une longue chaîne dans toute la longueur du chemin que doit parcourir le bateau, solidement fixée au sol à ses deux extrémités. Le bateau, en un point de son parcours, la chaîne le traverse dans toute sa longueur, et s'y trouve engagée dans la gorge d'une poulie dans laquelle elle ne peut pas glisser. La machine qui est installée sur le bateau, est employée uniquement à tourner cette poulie, qui tend à entraîner la chaîne, et par suite successivement ses diverses parties dans sa gorge. On pourrait en effet si elle n'était pas fixée au sol à ses deux extrémités. La chaîne ne pouvant pas céder à la force qui lui est ainsi appliquée, c'est le bateau qui se déplace dans toute sa longueur. Il existe à Paris un bateau de ce genre, qui fonctionne comme nous venons de le di-

Pour trouver ce mouvement absolu, il faut regarder le cerf-volant comme étant animé à la fois de deux mouvements, dont l'un est le mouvement de l'eau sur laquelle il flotte, et l'autre est son mouvement par rapport à cette eau, en composant à chaque instant les vitesses qu'il possède en vertu de ces deux mouvements (§ 337), on trouvera sa vitesse absolue dans l'espace.

Si ainsi que, lorsqu'on veut traverser une rivière en bateau, on va dans une direction perpendiculaire à celle du courant, on est obligé de diriger le bateau et de manœuvrer les rames comme si l'on voulait traverser la rivière obliquement, en remontant le courant. Si l'on agissait comme si l'eau était en repos, on irait rejoindre l'autre bord en un point qui, au lieu de se trouver en face du point de départ, serait situé beaucoup plus bas.

Si le mouvement du navire a la même direction que celui de l'eau sur laquelle il se meut, sa vitesse absolue sera égale à la somme ou à la différence de la vitesse de l'eau et de sa vitesse par rapport à l'eau, suivant qu'il marchera dans le sens du courant ou en sens contraire. Supposons, par exemple, qu'un bateau à vapeur, allant dans une eau tranquille, y prenne une vitesse de 5^m par seconde, et qu'on le fasse marcher sur une rivière dont le courant a une vitesse de 2^m par seconde : sa vitesse absolue sera de 7^m ou de 3^m par seconde, suivant qu'il descendra ou qu'il remontera le courant.

Il est clair, d'après cela, qu'un bateau à vapeur ne pourra remonter un courant qu'autant que la vitesse qu'il prendrait dans une eau tranquille sera plus grande que la vitesse du courant. Dans le contraire, si le bateau cherchait à remonter le courant, il serait entraîné par l'eau, et marcherait en sens contraire du sens dans lequel il tend à marcher, avec une vitesse égale à l'excès de la vitesse du courant sur celle qu'il prend par rapport à l'eau.

§ 338. **Cerf-volant.** — Tout le monde connaît les cerfs-volants qui servent de jouets aux enfants, et que l'on élève en l'air au moyen du vent. Il est aisé de se rendre compte de la manière dont ils peuvent être soutenus dans l'atmosphère par l'action de l'air. Un cerf-volant est une sorte de grande raquette, dont le cadre est formé au moyen de baguettes légères, et dont la surface est recouverte de papier collé sur ce cadre; une baguette droite le traverse dans toute sa longueur, et en forme, pour ainsi dire, l'axe. Si l'on présente cette surface de papier au vent, de manière que les molécules d'air viennent la rencontrer perpendiculairement, elle éprouve une pression dont l'intensité dépendra de la grandeur de la face et de la vitesse du vent (§ 330). On conçoit qu'il existe un

certain point tel, que si le cerf-volant était soutenu en ce point pour résister au vent, il se maintiendrait en équilibre et sa surface s'inclinerait ni d'un côté ni de l'autre: ce point on peut appeler le centre de pression. Si une ficelle était attachée à ce point même, et qu'elle fût retenue assez fortement à son extrémité, de manière à s'opposer à l'action du vent, l'action exercée par l'air sur la surface serait vaincue par la tension de cette ficelle. Mais si la ficelle est attachée à l'axe du cerf-volant au-dessous du centre de pression, il n'en sera plus de même: la tension de la ficelle ne pourra plus détruire la pression du vent. Le vent poussera en arrière la partie inférieure du cerf-volant, et celui-ci prendra ainsi une position inclinée, et qui tendra à se redresser horizontalement. Mais, d'un autre côté, le poids du cerf-volant et tout le poids de la queue, que l'on attache à sa partie inférieure, s'opposent à ce que sa surface s'approche trop de la position horizontale. La pression exercée par l'air, étant toujours perpendiculaire à la surface du cerf-volant, sera donc également dirigée de bas en haut: c'est cette pression qui fait mouvoir le cerf-volant, tant qu'elle l'emporte sur la résultante de son poids et de la tension de la ficelle.

§ 339. *Navigation aérienne.* — Dès qu'on eut trouvé le moyen de s'élever dans l'atmosphère à l'aide des ballons, on se procura le moyen de profiter pour effectuer des voyages. Mais, pour réaliser ce projet, il fallait pouvoir faire marcher à volonté un ballon dans une telle direction. Bien des tentatives ont été faites jusqu'à présent pour arriver à la solution de cette question, et les résultats ont été à peu près nuls; on se demande même s'il est possible de réussir dans de pareilles tentatives. En analysant cette question de la direction des ballons, il ne nous sera pas difficile de nous rendre un compte exact de sa nature, et de voir à quel point, et combien on peut compter en trouver la solution complète.

Imaginons qu'un ballon soit en équilibre dans une atmosphère, et que l'air de cette couche soit absolument immobile. Sera-t-il possible, en manœuvrant un appareil convenablement attaché au ballon, de déterminer un mouvement de transport de la machine, dans telle direction qu'on voudra? Il n'est pas difficile de répondre à cette question. D'abord il est bien clair qu'on pourra produire un mouvement dans une telle direction, on pourra tout aussi bien le produire dans une autre direction que l'air dans lequel se trouve le ballon est supposé immobile. Il suffira d'employer un gouvernail, analogue

ans les navires (§ 332), pour changer à volonté la direction, une fois qu'il aura été produit. Reste à voir si en effet on peut déterminer un mouvement de translation dans cet air immobile. C'est ce dont on ne doit pas douter, car il suffirait pour cela de lui adapter des appareils aux ailes des oiseaux, et susceptibles de se mouvoir d'une manière. Des appareils de ce genre, animés d'un mouvement va-et-vient, et présentant une grande surface à l'air, se mouvraient dans un sens, tandis qu'ils ne lui présenteraient leur tranche lorsqu'ils reviendraient en sens contraire. On pourrait attribuer certainement au ballon un mouvement de translation de ces espèces de rames à large surface, on pourrait y employer d'hélices semblables à celles que l'on adapte aux ballons (§ 335). Mais, si l'on réfléchit à la grandeur que doit nécessairement avoir un ballon pour pouvoir porter quelques personnes, et à la grande surface avec laquelle il doit rencontrer l'air en son mouvement, on se convaincra qu'un appareil de propulsion quel qu'il soit, étant mû par des voyageurs, ne pourra donner au ballon aérien qu'une faible vitesse. On peut avoir, il est vrai, l'idée de faire porter par le ballon une machine motrice, telle qu'une machine à vapeur, par exemple. Mais si l'on augmentait par là le poids dont on pourrait disposer pour faire mouvoir l'appareil, on augmenterait aussi considérablement le chargement du ballon : son volume devrait s'accroître en conséquence, et il y aurait une augmentation de la résistance à vaincre pour une même vitesse.

Il est probable que, quelle que soit la disposition adoptée, le transport qu'on pourra donner à un ballon, au milieu d'un air tranquille, sera toujours petite. Ajoutons à cela que, si l'on ne peut espérer d'arriver à produire un mouvement plus rapide en employant une autre force que celle des voyageurs, et qu'en augmentant en donnant à la machine entière des dimensions plus grandes que celles qui ont été données aux ballons ordinaires, l'appareil de propulsion devrait être lui-même très pesant, aussi léger que possible, et par suite extrêmement difficile à construire d'une manière convenable; cet appareil éprouverait nécessairement de fréquentes avaries, qui le mettraient souvent hors d'état de fonctionner.

Considérons maintenant ce qui se passerait, si l'on cherchait à faire porter un ballon au milieu d'une couche d'air animée d'un mouvement. Le ballon prendrait une vitesse absolue, égale à la résultante de la vitesse de la couche d'air, et de sa

couche d'air immobile, ou animée d'une faible vitesse d'après les relations des voyages aérostatiques, qu'il les couches d'air dans lesquelles ces voyages se sont effectués qu'une faible vitesse. habituellement un ballon met moins d'une heure à un grand nombre de kilomètres de départ. On doit donc regarder la question de la direction à volonté comme n'étant susceptible d'une solution que pour des circonstances atmosphériques qui ne surviennent qu'exceptionnellement. Le plus souvent un ballon, muni d'un organe de propulsion, ne pourrait pas lutter contre le vent de l'air au milieu duquel il serait plongé. Ajoutons à cela qu'un ballon ne pourrait pas même espérer de réaliser une véritable navigation aérienne, à la condition d'attendre, pour le départ, qu'il se fût dans des conditions convenables : car, d'une part, on est souvent obligé d'attendre très longtemps, et d'une autre part, on ne saurait ordinairement que l'atmosphère ne se maintienne dans de telles conditions, pendant la durée du voyage à effectuer.

On peut établir un parallèle entre la navigation maritime et la navigation aérienne. Les bateaux et les navires, munis de roues, ou des hélices, peuvent marcher dans toute une eau tranquille. ils peuvent aussi être dirigés à travers une eau courante, à la condition que la vitesse du courant

~~est~~ dans les mêmes conditions qu'un bateau à vapeur auquel on ~~devrait~~ faire remonter un torrent.

MACHINES QUI SERVENT A ÉLEVER LES LIQUIDES.

§ 340. L'élévation des liquides, et principalement de l'eau, entre dans une forte proportion parmi les divers travaux que l'on exécute à l'aide de machines. Tantôt on a besoin d'enlever l'eau de cavités plus ou moins profondes, afin de pouvoir s'y installer, et y travailler, soit à des constructions, soit à des exploitations de mines: tantôt on veut élever, à une faible hauteur, une partie des eaux d'une rivière, pour les employer à des irrigations; tantôt on veut faire monter de l'eau ou différents liquides, soit pour les usages domestiques, soit pour les besoins d'un établissement industriel. Un grand nombre de machines ont été imaginées pour remplir ces diverses objets: nous allons en faire connaître les dispositions générales.

La quantité de travail nécessaire pour élever une certaine masse d'un liquide à une hauteur déterminée s'obtiendra toujours en multipliant le poids du liquide à élever, évalué en kilogrammes, par la hauteur à laquelle il doit être élevé, estimée en mètres. Le nombre ainsi obtenu représentera la quantité de travail moteur qu'on devra appliquer à une machine, quelle que soit sa nature, pour qu'elle puisse produire le travail utile qui est représenté par l'élévation de la masse liquide à la hauteur voulue, en supposant toutefois qu'il n'y ait aucune perte de travail occasionnée par l'emploi de cette machine. En réalité, le travail moteur appliqué à une machine destinée à l'élévation d'un liquide sera toujours supérieur au travail utile que cette machine effectuera, parce qu'il est impossible d'éviter complètement les pertes de travail. Ces pertes sont dues en général: 1° aux frottements des parties solides de la machine les unes contre les autres; 2° aux chocs qui peuvent se produire entre ces parties solides; 3° au frottement du liquide contre les parois entre lesquelles il se meut; 4° aux changements brusques de grandeur ou de direction qui peuvent survenir dans la vitesse du liquide; 5° enfin à la vitesse que le liquide possède encore lorsqu'il est arrivé à la hauteur à laquelle il devait être élevé, vitesse qui est entièrement inutile, et qui n'a pu être donnée au liquide qu'aux dépens d'une portion du travail moteur appliqué à la machine. Quand on veut établir une machine pour élever un liquide, on doit toujours avoir en vue ces diverses causes de perte de travail, afin d'en atténuer l'effet autant que possible, au moyen de dispositions convenables.

484 MACHINES QUI SERVENT À ÉLÉVER LES LIQUIDES.

Les diverses machines qui servent à élever les liquides diffèrent les unes des autres en raison du volume plus ou moins grand de liquide qu'elles doivent déplacer, et de la hauteur plus ou moins considérable à laquelle elles doivent le monter. Mais il existe plusieurs espèces de machines qui peuvent être employées indifféremment dans les mêmes circonstances; pour choisir, entre ces diverses machines, celle qu'on devra adopter, on les compare sous le rapport de la perte totale de travail que chacune d'elles peut occasionner par sa nature, et aussi sous le rapport de la facilité ou moins grande d'installation et de manœuvre que chacune présentera. Si la machine ne doit fonctionner que momentanément pour être enlevée ensuite, la facilité d'installation devra entrer beaucoup dans le choix qu'on fera; si au contraire la machine doit demeurer dans le lieu où on l'installera, et y fonctionner pendant un temps un peu long, on devra surtout avoir en vue de diminuer autant que possible, les pertes de travail, et adopter celle qui est capable de produire le plus d'économie sous ce rapport.

§ 341. **Chapelet.** — Le chapelet est une machine destinée à élever l'eau à une petite hauteur: on l'emploie surtout pour les écluses, où l'on a besoin d'effectuer dans les lieux où l'on est au-dessous du niveau d'un cours d'eau, par exemple, dans les constructions des ponts et des moulins à eau. À cet effet, on construit un barrage, de manière à isoler le lieu où la construction doit être faite du reste du cours d'eau; puis, à l'aide du chapelet, on élève l'eau contenue à l'intérieur de ce barrage. On renouvelle d'une manière continue l'action de la machine de temps en temps, pendant la durée des travaux, afin de retirer l'eau qui filtre peu à peu à travers le barrage, et qui en s'accumulant pourrait gêner les ouvriers.

Le chapelet consiste en une chaîne sans fin, fig. 396, formée de chaînons de fer articulés les uns aux autres, et munie de disques qui sont fixés perpendiculairement au milieu de chaque chaînon. Cette chaîne s'engage sur le contour de deux roues A et B. En faisant tourner la roue A, on entraîne la chaîne, qui fait elle-même tourner la roue B. Dans ce mouvement, les diverses portions de la chaîne montent d'un côté, et descendent de l'autre côté, comme indiquent les flèches. La partie ascendante de cette chaîne se trouve engagée dans un tuyau, dont les dimensions transversales sont un peu plus grandes que celles des disques fixés aux chaînons, et plonge par sa partie inférieure dans l'eau à épuiser. Chaque fois qu'un disque, en montant, vient pénétrer dans le tuyau, au-dessus de lui une certaine quantité d'eau qui s'y trouve est entraînée: à mesure qu'il s'élève, il fait monter cette eau et

est ainsi soulevée jusqu'à la partie supérieure du tuyau, verse latéralement. Les dimensions des disques du chapeau sont un peu moins grandes que celles de la section intérieure du tuyau, afin d'éviter les frottements ; mais la différence est aussi petite que possible, de sorte qu'il ne passe pas une grande quantité d'eau entre les disques et le tuyau, ce qui en résulterait une perte correspondante de hauteur d'eau élevée.

On ne dispose pas le tuyau verticalement, mais on l'incline, comme on le voit, dans la figure 396. Dans ce cas, le tuyau peut être en sorte qu'il se présente comme un simple canal de circulation, en sorte que les parties de son intérieur qui constitue

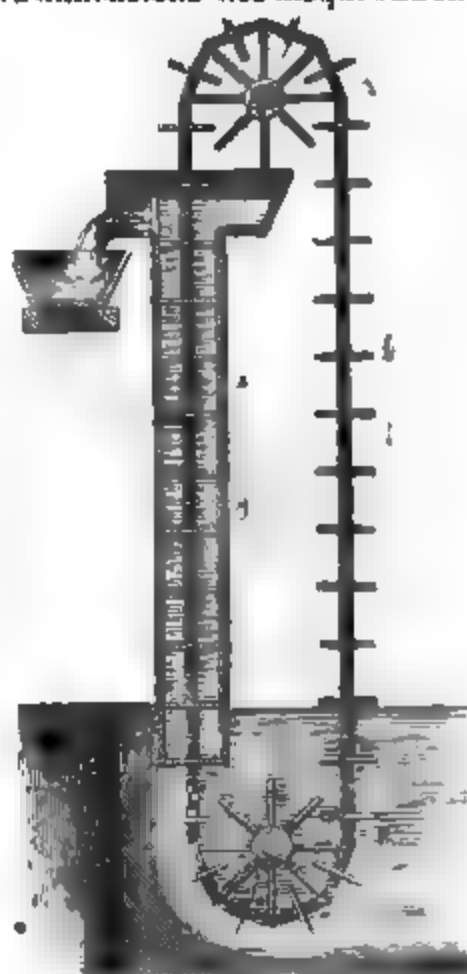


Fig. 396.

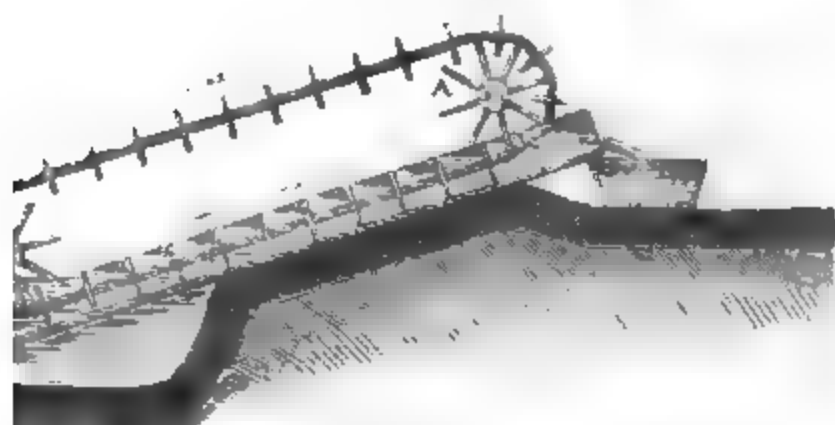


Fig. 397.

norie. — La norie est une machine qui a une grande

486 MACHINES QUI SERVENT À ÉLÉVER LES LIQUIDES.

analogie avec le chapelet. Elle se compose, comme lui, d'une chaîne sans fin qui s'engage sur le contour de deux roues, et qui les entraîne en mouvement de la même manière. Mais, au lieu que la chaîne porte des disques qui doivent faire monter l'eau au-dessus d'elle, dans un tuyau ou dans un canal incliné, elle est munie dans toute sa longueur de godets qui sont destinés à contenir le liquide à élever. Ces godets montent et descendent successivement, comme les disques du chapelet. Lorsqu'ils sont à la partie inférieure de leur course, ils s'emplissent d'eau ; ils montent avec l'eau qu'ils contiennent, et doivent avoir par conséquent, en montant, leur ouverture tournée vers le haut ; arrivés près de la roue supérieure, ils tournent autour de cette roue, se vident en s'inclinant, pour redescendre, ayant l'ouverture tournée vers le bas, pour venir s'emplir de nouveau dans la masse d'eau qui doit être élevée. Le tuyau vertical, ou le canal incliné, dans lequel s'engagerait la partie ascendante de la chaîne sans fin, dans le chapelet, n'existe pas dans la noria ; sa présence serait tout à fait inutile.

La noria n'est pas seulement employée à des épuisements d'eau. On s'en sert souvent, dans les établissements industriels, pour élever différents liquides à des étages supérieurs, et même aussi pour élever des corps solides réduits à l'état de poussière. C'est ainsi que, dans les moulins à farine, on emploie des norias pour faire monter le mélange de son et de farine, qui sort des meules, et l'amener dans les appareils destinés à opérer la séparation de ces deux substances.

Les machines à draguer, dont on se sert pour enlever les sables qui gênent la navigation dans le lit d'une rivière, ne sont autre chose que des norias, dont les godets descendent au fond de l'eau et s'y emplissent de sable, qu'ils remontent ensuite pour le verser dans un bateau destiné à l'emporter. Dans ce cas, les godets sont percés sur toute leur surface d'un grand nombre de petits trous, par lesquels s'écoule l'eau qui s'y trouve mêlée au sable. Ces machines sont installées sur les flancs d'un bateau, que l'on promène dans toute l'étendue des lieux où le lit de la rivière a besoin d'être approfondi ; elles sont mises en mouvement, soit par un manège à cheval, soit par une machine à vapeur que porte le bateau dragueur.

§ 343. *Vis d'Archimède.* — On emploie encore très souvent, pour effectuer des épuisements à de petites profondeurs, une machine en forme de vis, qui a été imaginée par Archimède, et qui porte son nom. Pour faire comprendre comment cette machine fonctionne réduisons-la à sa plus grande simplicité. Concevons qu'un tube en verre ait été enroulé autour d'un cylindre, de manière à y représenter

de d'un filet de vis, *fig. 398* ; et que l'appareil ainsi constitué étant installé dans une position inclinée, puisse recevoir un mouvement de rotation autour de l'axe du cylindre, à l'aide d'une

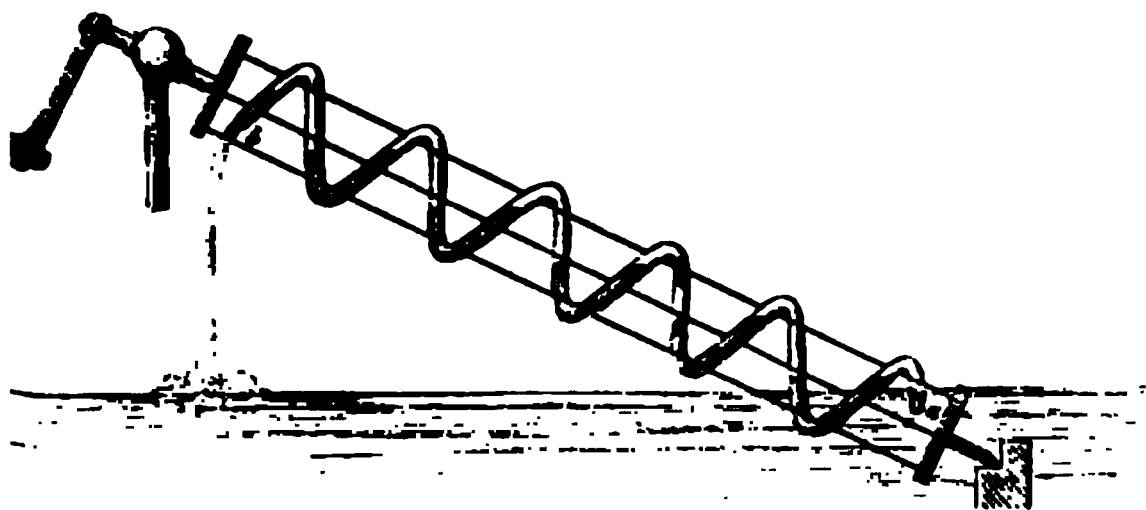


Fig. 398.

elle fixé à son extrémité supérieure. Quand on fera tourner la machine, l'extrémité inférieure *a* du tube de verre décrira une spirale de cercle, dont le plan, perpendiculaire à l'axe du cylindre, sera incliné à l'horizon. Si une portion de cette circonférence plonge dans l'eau, l'extrémité *a* du tube de verre pénétrera dans le liquide, puis en sortira, y pénétrera de nouveau, et ainsi de suite. Au moment où cette extrémité du tube sortira de l'eau, elle contiendra une certaine quantité de liquide, qui se trouvera isolée, et qui, pendant la rotation de la machine, viendra à l'instant occuper la partie inférieure de la spire dans laquelle elle est engagée. Cette eau, contenue dans le tube, marchera donc successivement le long du cylindre, et finira par s'écouler à sa surface supérieure.

À chaque tour que l'on fera faire au cylindre, une nouvelle quantité de liquide s'engagera dans le tube, qui en contiendra ainsi dans une de ses spires. Ces masses d'eau, qui sont élevées simultanément, sont séparées les unes des autres par l'air qui s'est introduit dans le tube pendant que son extrémité *a* était au-dessus de la surface libre du liquide à élever. En étudiant avec soin le mécanisme de l'appareil, on reconnaît que la quantité d'air qui est introduit ainsi dans le tube n'est pas suffisante pour remplir complètement l'espace compris entre deux masses d'eau successives, en conservant la même force élastique : cet air est donc obligé de se dilater, et il en résulte que la pression atmosphérique, exercée librement par l'extrémité *b* du tube, fait retomber une partie de chaque masse d'eau dans la spire qui est au-dessous. Pour éviter cet inconvénient, on peut pratiquer sur le



l'eau, à chaque fois que l'on fait sauto du cylindre, qui s'introduirait dans le tubo ne serait pas séquestré, et ne pourrait pas être élevée; on voit en effet, et le réservoir inférieur dans lequel il plonge, dans ce cas un système de vases communicants, séquent, les surfaces libres, dans le tubo et dans le réservoir, devraient toujours se trouver à un même niveau. Les petites ouvertures pratiquées tout le long du tubo, par où il n'y a qu'un instant, peut cependant marcher en permettant à l'air extérieur de s'introduire dans le tubo, et ainsi séparer une certaine quantité d'eau du reste du liquide.

Les vases d'Archimède, telles qu'on les emploie pour épuiser les eaux, ne sont pas construites comme celle-ci. Elles se composent d'un cylindre intérieur, fig. 399: d'une cloison contournée autour



bords extérieurs de cette cloison. Une moitié de cette été enlevée sur la figure, pour faire voir la disposition, ainsi que la manière dont l'eau s'y place sur les faces de la cloison. Souvent, au lieu d'une seule cloison on en met deux, et même trois, qui s'étendent dans toute la longueur du noyau, en tournant autour de lui dans le même sens, et sont parallèles entre elles : c'est ce que montre la *fig. 399*, où l'on voit que la vis est formée de deux cloisons de ce genre. Habituellement dans les vis d'Archimède construites de cette manière, l'eau peut reculer librement à l'intérieur, tout le long du noyau, et ne rencontre pas, en conséquence, les inconvénients qui pourraient résulter de la dilatation de l'air emprisonné entre les masses d'eau qui contiennent deux spires successives. Par la même raison,

il est plus indispensable que la base inférieure du cylindre ne soit immergée en partie dans l'eau qu'il s'agit d'élever.

La hollandaise. — On emploie beaucoup, en Hollande, une vis d'épuisement qui n'est qu'une modification de la vis d'Archimède. Imaginons que, dans cette vis, *fig. 399*, on ait superposé une enveloppe cylindrique qui ferme extérieurement l'espace entre les spires successives des cloisons, il ne restera plus qu'à faire tourner les cloisons et le noyau central auquel elles sont fixées. Concluons qu'une pareille vis soit installée à l'intérieur d'un canal cylindrique, dans lequel elle puisse tourner, de manière que les bords extérieurs des cloisons dont elle est formée soient presque en contact avec les parois de ce canal : on aura ainsi la vis hollandaise. En lui donnant un mouvement de rotation, on élèvera de l'eau aussi bien qu'avec la vis d'Archimède. Une portion de l'eau pourra retomber dans le réservoir inférieur, en passant entre les bords des cloisons et les parois du canal : pour diminuer le travail qui résulte de cette circonstance, on a soin de ne pas rendre la vis et le canal cylindrique dans lequel elle tourne, parfaitement nécessaire pour qu'il n'y ait pas de frottement. L'inconvénient d'être signalé est compensé d'ailleurs par un avantage : la vis hollandaise sur la vis d'Archimède. Dans cette machine, tout le poids de l'eau que contient la vis est supporté par son axe ; dans la vis hollandaise, au contraire, les bords du canal qui l'enveloppe en partie supportent une partie du poids de cette eau, composante qui est dirigée perpendiculairement à la longueur du canal, tandis que la vis n'a à supporter que l'autre composante qui est parallèle à son axe : il en résulte que les frottements de l'axe sur ses supports sont moins considérables dans la vis hollandaise que dans la vis d'Archimède.

Des vis de ce genre sont employées en grand nombre en Hollande pour rejeter, par-dessus les digues, les eaux qui se répandent sur les terrains bas, et qui proviennent, soit des pluies, soit des inondations. Ces machines sont mises en mouvement par des moulins à vent.

On emploie assez souvent des vis entièrement analogues aux hollandaises pour transporter à une petite distance des corps solides réduits en poussière. À cet effet, on installe une vis horizontale dans une sorte de canal dont elle occupe toute la longueur. Cette vis a laquelle on donne un mouvement de rotation autour de son axe saisit les poussières accumulées dans un réservoir placé à l'une des extrémités du canal : elles se trouvent ainsi engagées entre ses spires, et sont conduites jusqu'à l'autre extrémité, où elles tombent dans un second réservoir. Dans les moulins à farine, on se sert couramment de la vis dont nous parlons et de la noria § 342, pour transporter d'un point à un autre de l'établissement le mélange de son et de farine qui sort des meules ; la première est affectée spécialement au transport de ce mélange dans un sens horizontal, et la seconde au transport dans le sens vertical.

§ 345. *Roue à palettes.* — On se sert quelquefois, pour élever l'eau à une faible hauteur, d'une grande roue dont la circonférence est garnie de palettes planes. La fig. 400 représente une roue de ce genre, qui est établie à la gare de Saint-Ouen, près Paris. Elle est destinée à faire monter de l'eau prise dans la Seine, pour élever un niveau suffisamment élevé à l'intérieur de la gare. À partir du bas de la roue, les palettes, en remontant, se meuvent dans un coursier cylindrique : de chaque côté existe également un mur vertical qui s'élève à une hauteur convenable : en sorte que les palettes se trouvent ainsi emboîtées exactement dans leur contour, et l'eau qui s'engage entre elles est obligée de les suivre dans leur mouvement ascendant. Lorsqu'une palette chargée d'eau arrive en A, cette eau s'écoule par-dessus la crête du coursier circulaire, et se rend dans la gare. On a donné aux palettes une certaine inclinaison, par rapport au rayon auquel elles correspondent, afin de faciliter cet écoulement.

La roue est mise en mouvement par une machine à vapeur, qui agit sur elle par l'intermédiaire d'une roue dentée que l'on voit sur la figure. Cette roue dentée engrène avec les dents que porte intérieurement une des couronnes auxquelles sont adaptées les palettes. D'après la manière dont l'action de la machine à vapeur est ainsi transmise à la roue à palettes, on voit que l'axe de cette roue n'est pas très fortement chargé par la masse d'eau qu'elle soulève, et qu'en conséquence la pression de cette masse d'eau sur les palettes

ne pas lieu à des frottements beaucoup plus grands que si elle marchait à vide; car la roue dentée qui fait tourner la roue élévatoire exerce sur elle une pression de bas en haut, qui détruit en grande partie la pression résultant du poids de l'eau soulevée.

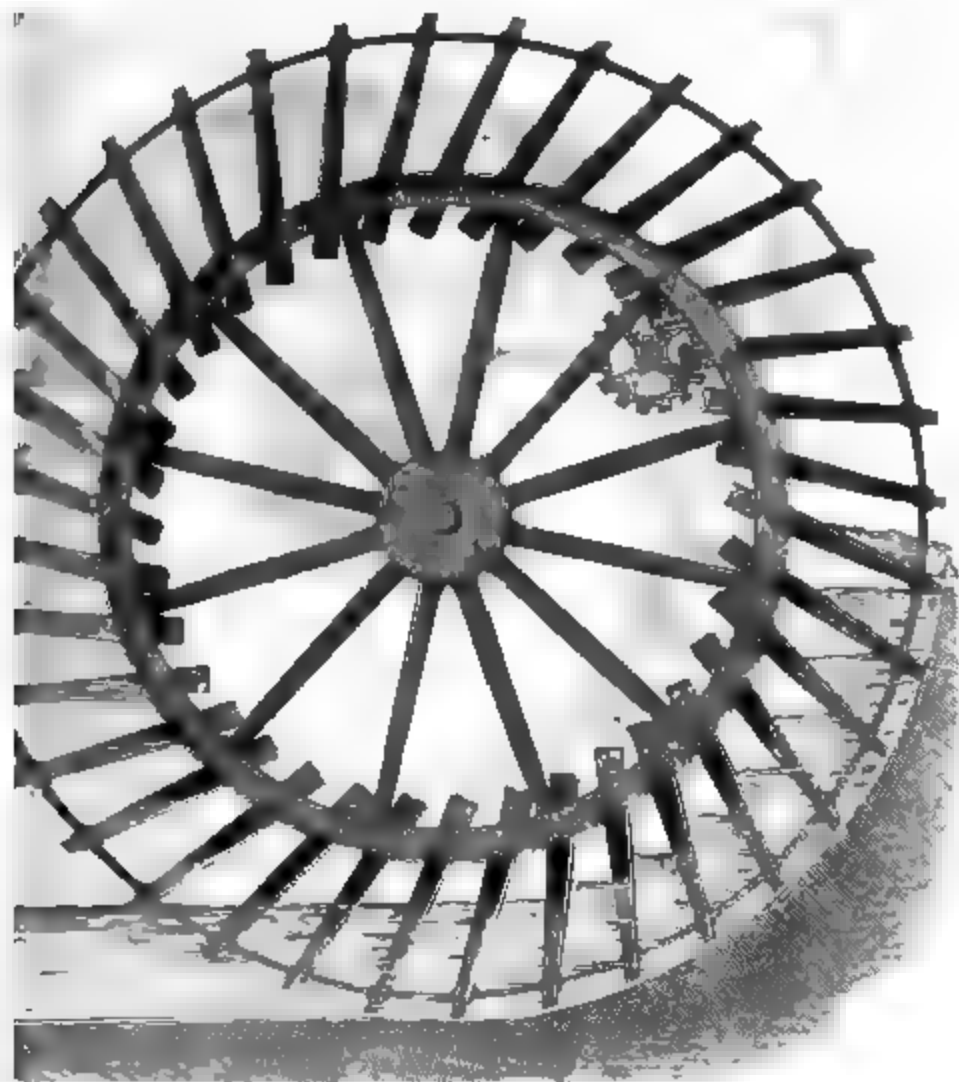


Fig. 400. (Échelle de 6 millimètres pour mètre.)

416. **Roue élévatoire.** — Les fig. 401 et 402 représentent une d'une autre espèce, qui est destinée à remplir le même objet que celle dont nous venons de parler. Cette roue, à laquelle on donne le nom de *roue élévatoire*, porte à sa circonférence un grand nombre de compartiments ou augets qui doivent contenir l'eau à élever. La roue étant animée d'un mouvement de rotation dans un sens convenable, les augets viennent plonger dans le bief

492 MACHINES QUI SERVENT À ÉLEVER LES LIQUIDES

A, fig. 401; ils s'y emplissent d'eau, par l'extérieur de l'arbre central, et ils montent pleins jusqu'à une certaine hauteur; enfin ils l'eau dans les caisses B, C, par des ouvertures pratiquées à l'intérieur de la roue, et de là elle se rend dans les canaux D.

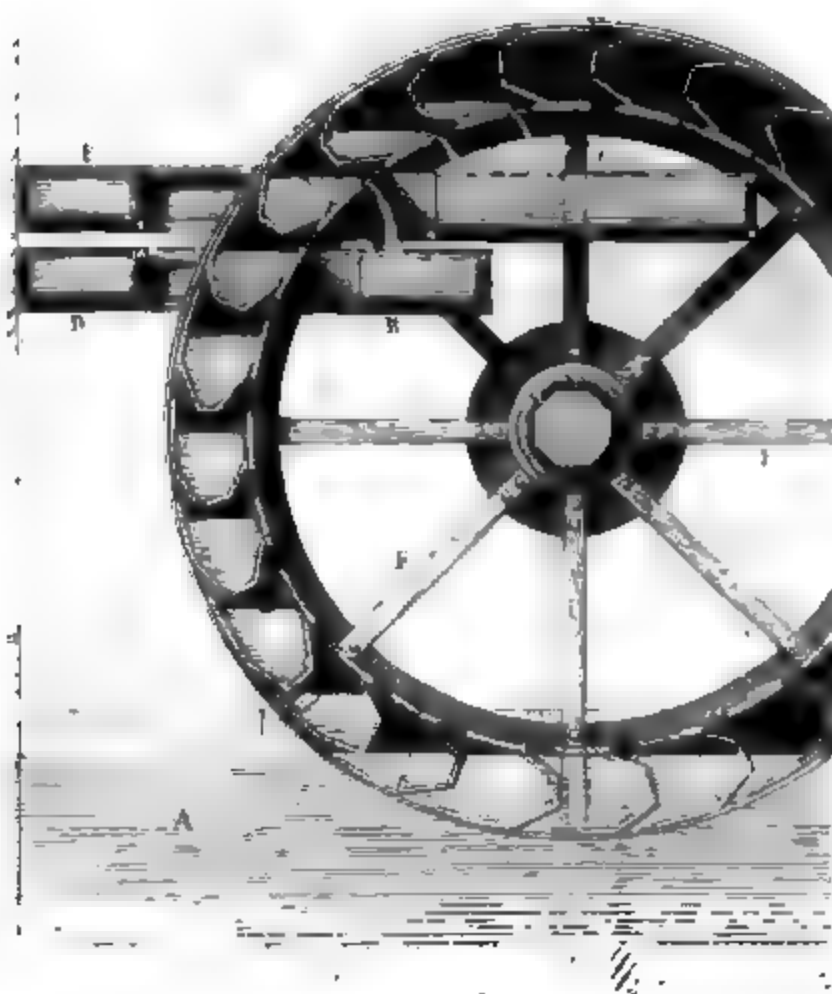


Fig. 401. Échelle de 12 millimètres pour mètre

lesquels elle s'écoule. Les bras F, qui relient le contour à l'arbre central, n'occupent pas toute la largeur de l'arbre; c'est ce qui permet aux caisses B, C, de pénétrer à l'intérieur, de part et d'autre de ces bras, sans cependant gêner le mouvement. Un moteur hydraulique, placé à côté de la roue, fait tourner l'arbre G, et le mouvement est transmis à la roue par l'intermédiaire d'un engrenage.

On voit qu'ici l'arbre de la roue supporte tout le poids de l'eau élevée, ce qui détermine des frottements considérables.

Mé, il n'y a pas à craindre les pertes d'eau qui se produisent toujours dans la roue précédente, entre les palettes et le *châssis*, pertes qu'on ne peut pas éviter complètement par une construction, et qui obligent de donner à la roue une vitesse grande.

La roue que représentent les fig. 401 et 402 est établie à Ciry-e, près de Soissons ; elle y est employée à élever une partie

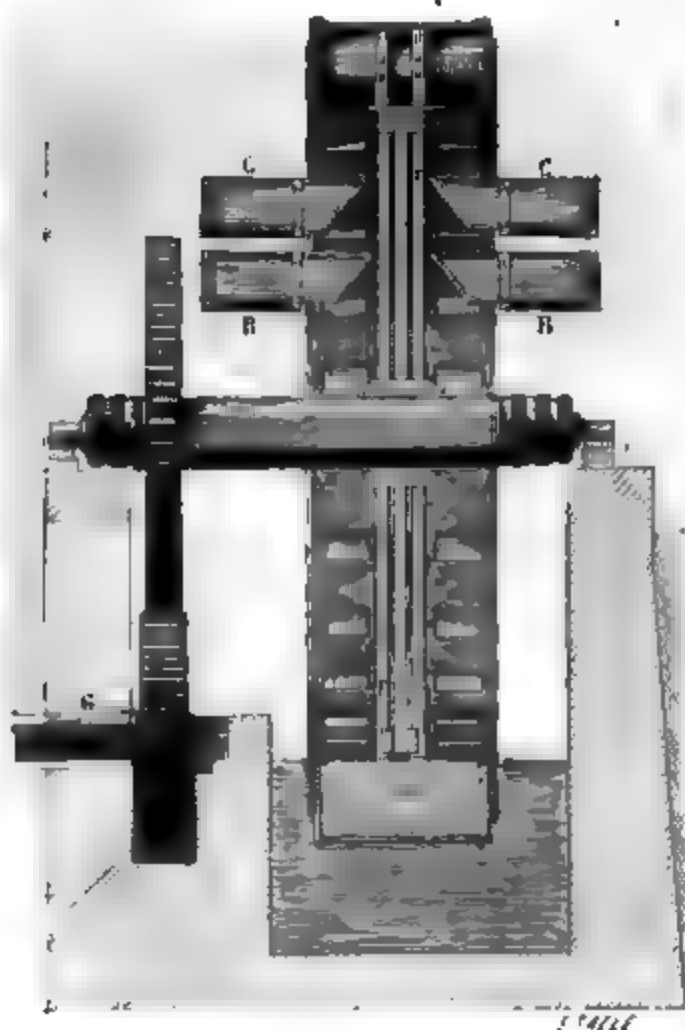


Fig. 402.

de la rivière de Vesle, pour les faire servir à des irrigations. Le canal E, fig. 401, conduit l'eau sur les points les plus élevés des terres à irriguer ; le canal D, alimenté par les caisses B qui reçoivent les premières masses d'eau sorties des augets, mène cette eau aux parties plus basses.

494 MACHINES QUI SERVENT A ÉLEVER LES LIQUIDES.

§ 347. **Tympan.** — Le tympan, fig. 403 et 404, a de l'analogie avec la roue élévatoire; il en diffère en ce que, puisant l'eau à la circonférence, il la déverse près de son axe. Il consiste en un tambour creux, mobile autour de son axe, et dans lequel sont des cloisons contournées en spirale; ces cloisons partent du centre, et s'étendent jusqu'à la circonférence. Le tympan plonge, par sa partie inférieure, dans l'eau qu'il s'agit d'élever; cette eau s'intre-

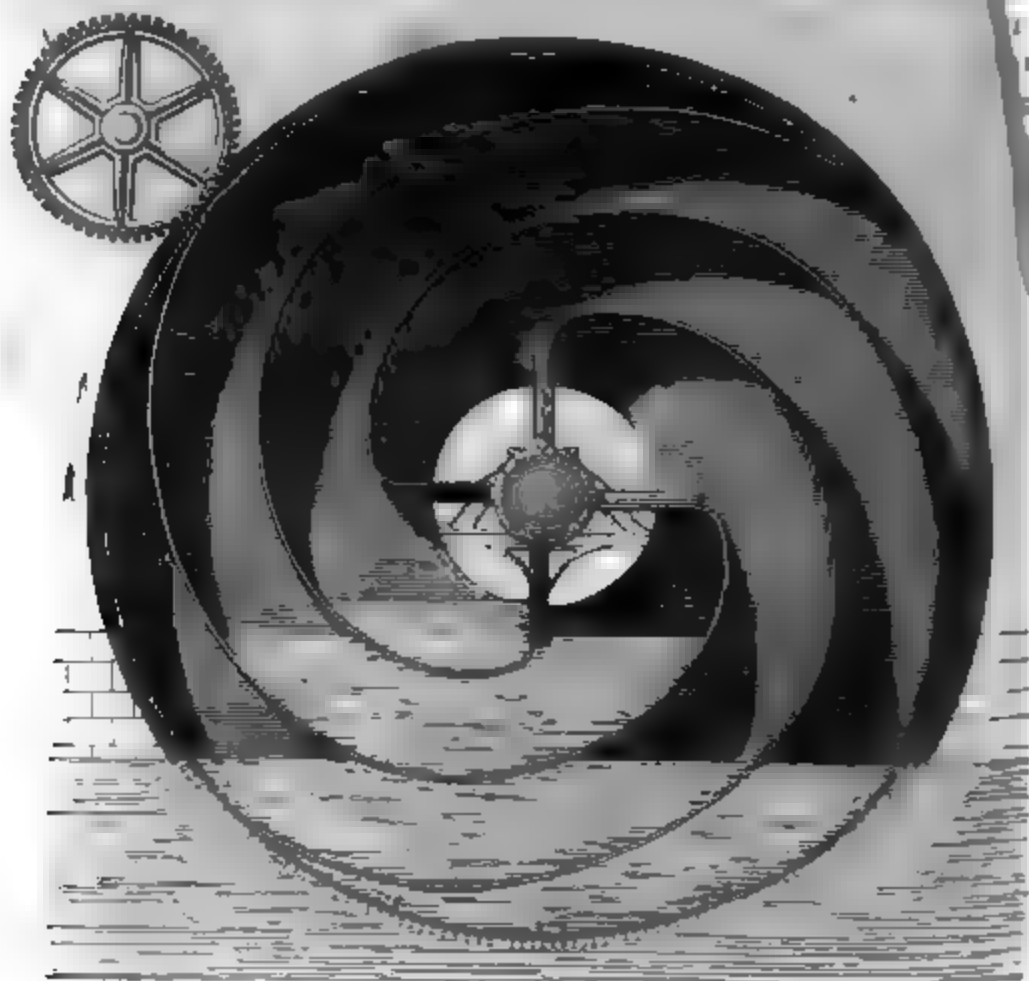


Fig. 403. (Échelle de 12 millimètres pour mètre.)

duit entre les cloisons, et s'y maintient au même niveau qu'à l'extérieur, tant que la masse d'eau intérieure ne se trouve pas isolée. Mais, lorsque le tympan est animé d'un mouvement de rotation, dans le sens de la flèche, les extrémités des cloisons viennent sortir de l'eau les unes après les autres: les masses d'eau contenues dans chacune d'elles se trouvent donc successivement séparées du reste du liquide. Chaque masse d'eau, étant ainsi isolée, tend à

à se placer au point le plus bas de la cloison courbe qui la mesure que le tympan tourne, cette eau se trouve soulevée et coule en même temps le long de la cloison, de manière à s'échapper du centre : enfin elle arrive bientôt au niveau des ouvertures centrales qui sont pratiquées sur les deux faces du tympan ; elle s'écoule au dehors, de part et d'autre, par ces ou-

vertures représentées dans les figures 403 et 404 (fonctionnement du seau pour élévation de l'eau) qui servent à l'écoulement des rizières et autres lieux. Une roue est fixée sur tout son diamètre au milieu de sa circonférence ; cette roue engrène avec une autre plus petite qui transmet son mouvement au tympan.

Seaux. — Pour l'eau à une hauteur grande, et non pour puiser l'eau, on emploie très souvent un seau que l'on accroche à l'extrémité d'une corde, et on le descend ; la corde, au lieu de la termine, se fixe à une poulie, et qu'il arrive à l'endroit où il doit enlever

Dès qu'il a plongé le seau dans l'eau, la quantité dans le seau se couche sur le côté, s'emplit peu à peu de liquide, et le seau devient bientôt complètement rempli ; alors on retire la corde, et elle sort du puits avec le seau plein d'eau.

C'est assez incommode d'opérer en tenant directement dans ses mains la corde à laquelle le seau est attaché, parce que, pour éviter le frottement du seau contre les parois du puits, pendant qu'on le retire, on est obligé de se pencher de manière à éloigner la corde des parois. Aussi opère-t-on habituellement d'une autre façon.

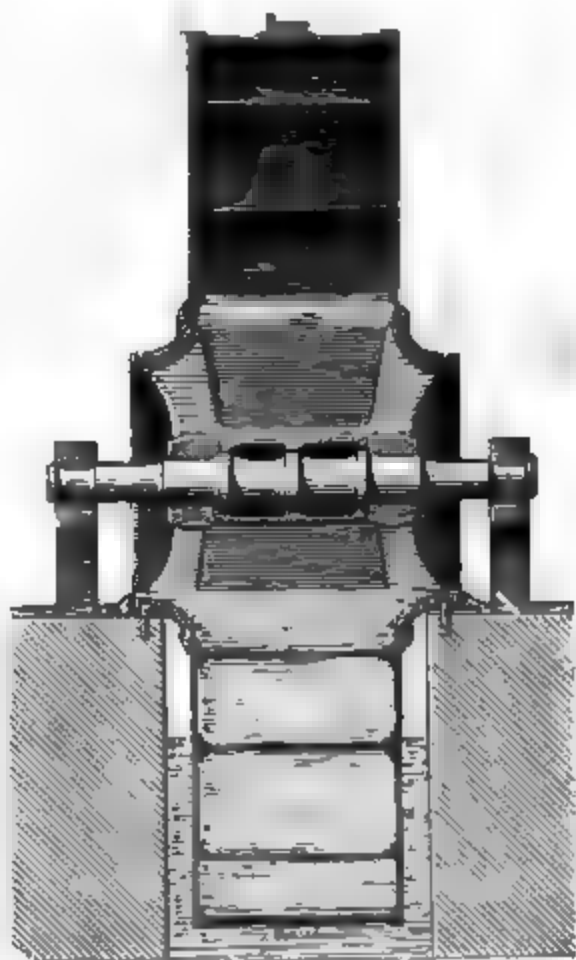


Fig. 401.

La plus souvent la corde s'enroule sur un treuil à manivelle (§ 334) qui s'étend horizontalement au-dessus du puits, et l'on remonte le seau en faisant tourner la manivelle. Outre la commodité que présente cette disposition, on y trouve l'avantage de pouvoir remonter un seau de plus grandes dimensions, soit en employant un treuil dont le rayon soit notablement plus petit que le rayon de la manivelle, soit en ne faisant agir la manivelle sur le treuil que par l'intermédiaire de roues dentées.

Quand on opère, comme nous venons de le dire, au moyen d'un seul seau, attaché à l'extrémité d'une corde, que l'on descend et qu'on remonte plein d'eau, il se présente deux inconvénients

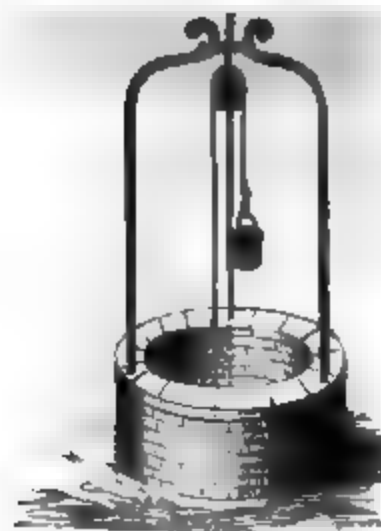


Fig. 103.

qu'il est bon de chercher à éviter, et tout lorsqu'on doit répéter la manœuvre pendant un certain temps sans interruption. Le premier consiste en ce qu'il perd du temps pendant qu'on laisse descendre le seau vide; le second tient en ce que, lorsqu'on remonte le seau plein, on n'a pas seulement à vaincre le poids de l'eau qu'on élève, mais aussi le poids du seau et celui de la corde. On fait disparaître ces deux inconvénients, en attachant un seau à chacune des extrémités de la corde, et la faisant passer sur une poulie dont la chape est fixée au-dessus de l'orifice du puits, fig. 405. Si l'on tire de haut en bas l'une des deux parties

de la corde qui se détachent verticalement de la gorge de la poulie, le seau qui est à son extrémité descend; mais en même temps l'autre seau monte. On voit que, par là, chaque seau descend vide pendant que l'autre monte plein d'eau; et de plus les poids des deux seaux se font équilibre par l'intermédiaire de la poulie, ce qui fait qu'on n'a réellement à vaincre que le poids de l'eau qu'on élève. Quant au poids de la corde, qui est souvent de peu d'importance, il agit tantôt comme force résistante, tantôt comme force motrice; les poids des deux portions de cette corde qui sont situées de part et d'autre de la poulie se neutralisent en partie: l'excès de l'un ou de l'autre agit seul pour ralentir ou accélérer le mouvement, suivant que le seau plein est plus bas ou plus haut que le seau vide.

§ 349. *Montage des marais-salers.* — Lorsqu'on a besoin d'extraire d'un puits une quantité d'eau assez grande, on peut encore se

ix: mais alors on leur donne de grandes dimensions, et ils ont le nom de *tonnes*. En outre on remplace la force des hommes par celle des chevaux ou de la vapeur, pour les faire manœuvrer le puits.

Nous pouvons donner comme exemple des machines dont on se sert en ce cas, le *manège des maraîchers*, fig. 406, qui est très

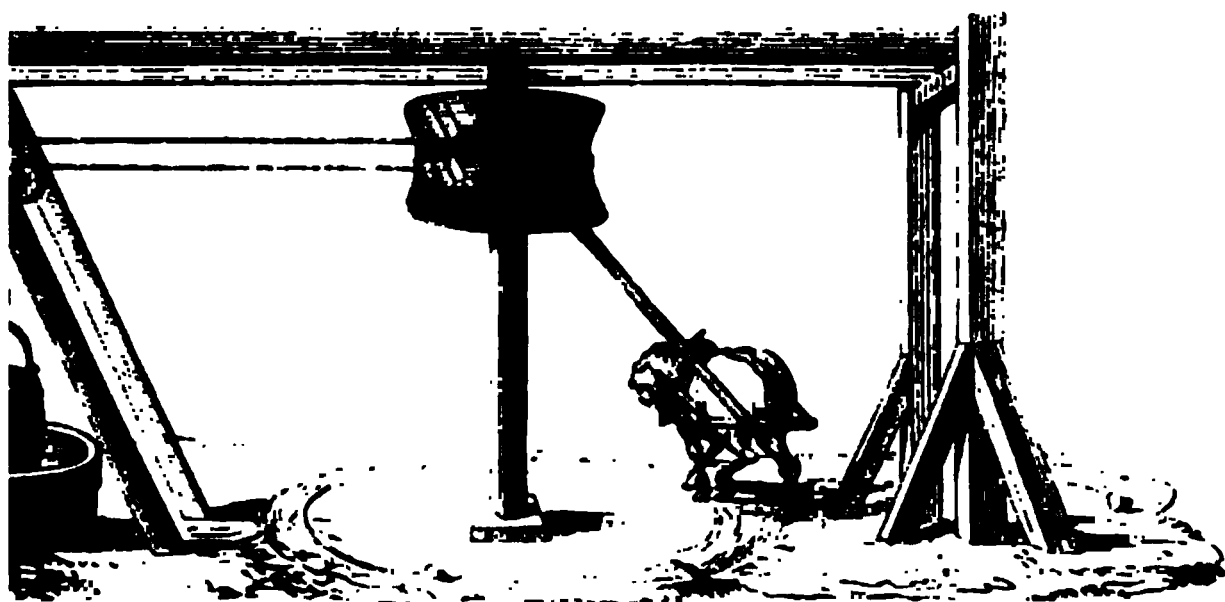


Fig. 406.

est dans les environs de Paris. Deux poulies sont disposées à égale distance l'une de l'autre, au-dessus du puits, et à une petite distance d'un arbre vertical, qui peut tourner sur lui-même, et qui a un tambour à sa partie supérieure. Une corde fait deux tours sur ce tambour, et s'en détache de part et d'autre, pour passer dans les gorges des deux poulies; aux deux extrémités de la corde sont suspendues les deux tonnes qui doivent servir à lever l'eau. On attèle un cheval à l'extrémité d'un long levier qui est fixé à l'arbre du tambour. Ce cheval, en tirant, fait tourner l'arbre, et la corde qui enveloppe le tambour s'enroule d'un côté et se déroule de l'autre: et la tonne vide descend pendant que la tonne pleine monte. Lorsque le cheval, en tournant ainsi dans un sens, a élevé la dernière tonne jusqu'à l'orifice du puits, on la vide en la coulant l'eau qu'elle contient dans un réservoir placé à côté du puits; pendant ce temps la tonne qui est au fond du puits s'est remplie d'eau: on fait alors marcher le cheval en sens contraire, et les choses se passent comme précédemment.

Chaque tonne est munie, comme les seaux ordinaires, d'une anse par laquelle elle est suspendue à l'une des extrémités de la corde; cette anse n'est pas attachée en deux points diamétralement

opposés du bord supérieur de la tonne : elle descend puis saisit deux espèces de tourillons qui sont fixés à la tonne et d'autre, à une faible distance au-dessous du milieu de sa circonférence. Au moyen de cette disposition, on voit que la tonne pleine tiendra bien d'elle-même dans une position convenable pour ne pas perdre l'eau qu'elle contient ; mais qu'on n'éprouvera pas de difficulté à la faire basculer autour de ces deux tourillons pour parce que son centre de gravité se trouvera très rapproché de la ligne qui joint ces points de suspension.

§ 350. *Machines à manivelles.* — Pour faire monter les tonnes pleines et descendre les tonnes vides, dans les puits d'égout, soit pour l'épuisement des eaux, soit pour l'extraction des boues, on se sert de machines entièrement pareilles au manège à rats, mais construites avec de plus grandes dimensions. Les deux poulies établies au-dessus du puits portent les manivelles ; et c'est de là que vient le nom de *machines à manivelles* ; on donne à la machine tout entière. Une machine de ce genre est mise en mouvement par des chevaux ou par une machine à vapeur.

Ici, comme dans le cas d'une corde qui passe sur une poulie, et qui supporte deux seaux à ses deux extrémités (page 496), les poids des deux tonnes se font équilibre ; en sorte que si l'on fait abstraction du poids du câble elles sont suspendues, on n'a réellement à vaincre que le poids de l'eau contenue dans la tonne qui monte. Quant au poids du câble, ainsi que nous l'avons déjà dit, il agira tantôt comme une résistance, suivant que la tonne qui monte est plus haut ou plus bas dans le puits que la tonne qui descend ; qui en résultera sera égale à la différence des poids des deux tonnes et du poids du câble qui descend dans le puits, depuis les manivelles jusqu'aux tonnes. Cette action du poids du câble ne peut être négligée, surtout si le puits est profond. Elle ne donne lieu à aucune perte de travail, si ce n'est celle qui résulte de l'augmentation des frottements ; car, si elle détermine un moment de résistance pendant une partie du mouvement, elle produit, plus tard, au contraire, une diminution de la résistance qu'on aurait à vaincre sans elle : et il y a compensation exacte. Mais il résulte de cette action variable du câble, que la résistance totale à vaincre décroît continuellement pendant tout le temps qu'une tonne pleine met à monter dans le puits à son orifice. Pour obvier à cet inconvénient, on a imaginé une sorte de machine qui agit sur le tambour de la machine à manivelles, de sorte que la résistance agisse sur le tambour de la machine à manivelles.

d'un bras de levier de plus en plus grand, à mesure que la densité diminue ; à cet effet on forme le tambour de deux cônes, sur chacune desquelles doit s'enrouler et se dérouler successivement une des deux portions du câble. Le câble, en passant sur un de ces cônes, dispose ses spires successives à l'opposé des autres, et sur des parties de la surface dont le rayon augmente de plus en plus : le contraire a lieu lorsqu'il se déroule.

Il est clair qu'il n'est pas indispensable d'avoir un seul câble qui fait plusieurs tours sur le tambour, pour s'en détacher de part et d'autre, venir passer sur les molettes, et descendre dans le puits de mine à supporter les deux tonnes par ses deux extrémités ; ordinairement on en a deux, un pour chaque tonne. Chacun de ces câbles est attaché au tambour par une de ses extrémités ; ils tournent en sens contraire sur ce tambour, et sont disposés de telle sorte que lorsque l'un des deux est déroulé, l'autre soit au contraire enroulé, de telle sorte que l'une des tonnes soit à l'orifice du puits lorsque l'autre est au fond.

11. Pompes.—Dans les diverses machines destinées à élever les liquides, dont nous avons parlé jusqu'à présent, il existe des pompes mobiles qui puisent le liquide dans le réservoir inférieur, et le font progressivement monter, et ne l'abandonnent que lorsqu'il est parvenu à la hauteur voulue. Les pompes ont aussi pour objet d'élever les gaz, mais elles fonctionnent d'une tout autre manière. Les pièces mobiles qui entrent dans leur composition, et qui reçoivent presque toujours un mouvement de va-et-vient, ne se meuvent que dans une très petite portion de la hauteur totale de la colonne de liquide que le liquide doit être élevé.

Une pompe consiste, en général, dans une capacité fermée, dont les dimensions intérieures peuvent augmenter ou diminuer à volonté, et la communication avec les tuyaux dans lesquels doivent se élever les liquides est successivement établie et interrompue à des moments convenables. On donne le nom de *corps de pompe* à la partie fixe de cette capacité, qui est ordinairement cylindrique. Le *piston* est une pièce mobile qui se place dans le corps de pompe, et s'adapte exactement contre ses parois ; en se mouvant le long des parois, il fait varier l'étendue de l'espace intérieur auquel il sert de piston.

C'est au moyen de *soupapes* que l'on établit une communication intermittente du corps de pompe avec les divers tuyaux nécessaires au jeu de la pompe.

12. Les soupapes que l'on emploie ont des formes très variées ; nous indiquerons que les principales.

500 MACHINES QUI SERVENT À ÉLÉVER LES LIQUIDES

La soupape à clapet, *fig. 407*, consiste en une plaque mobile autour d'une charnière, et capable de s'appliquer exactement sur une ouverture pratiquée dans la paroi de la machine. Cette plaque, qui est généralement doublée de cuir, afin d'établir un contact plus intime avec les bords de l'ouverture qu'elle doit fermer. Souvent le clapet n'a pas de charnière, et est formé d'un simple cuir dont un des bords est cloué à côté de l'ouverture que la soupape doit fermer. Dans ce cas, la flexibilité du cuir et la charnière, et pour que cette flexibilité n'empêche pas de fermer exactement l'ouverture, on fixe sur sa face interne une plaque métallique de moins grande dimension, qui a une rigidité suffisante, sans cependant s'opposer au mouvement qu'elle doit prendre.



Fig. 407.

La soupape conique, *fig. 408*, consiste en un tronçon conique, qui peut fermer exactement l'ouverture dont les bords sont égaux. Cette soupape est munie d'un anneau fixe en son milieu, qui sert à la diriger dans son mouvement. À cet effet, la soupape traverse une bride qui est fixée au-dessous, et elle se termine par une tête destinée à empêcher la soupape de trop s'éloigner de l'ouverture qu'elle doit fermer.



Fig. 408.

La soupape à boulet, *fig. 409*, consiste en une sphère qui, venant s'appuyer sur les bords d'une ouverture circulaire, en venant s'appuyer sur ses bords, elle ferme l'ouverture.

La soupape à boulet, *fig. 409*, consiste en une sphère qui, venant s'appuyer sur les bords d'une ouverture circulaire, en venant s'appuyer sur ses bords, elle ferme l'ouverture.



Fig. 409.

La soupape à boulet, *fig. 409*, consiste en une sphère qui, venant s'appuyer sur les bords d'une ouverture circulaire, en venant s'appuyer sur ses bords, elle ferme l'ouverture. La soupape n'a pas besoin d'être dirigée dans son mouvement; la régularité de forme qu'elle a dans toutes les parties de sa surface fait qu'elle se présente toujours exactement l'ouverture, de quelle manière elle se présente. On est seulement obligé de disposer, au-dessus de l'ouverture, d'une bride destinée à empêcher la soupape de trop s'éloigner. Lorsqu'une soupape à boulet doit avoir de grandes dimensions, on creuse ordinairement le boulet, afin qu'il ne soit pas trop pesant: on peut même ainsi régler son poids de telle manière qu'il fonctionne de la manière la plus avantageuse.

§ 353. La forme d'un piston dépend de la forme de la pompe dans lequel il doit se mouvoir. Le plus ordinaire des corps de pompe est un cylindre à base circulaire; il

forme d'un cylindre, *fig. 410*, dont la hauteur est petite que celle du corps de pompe. Avant de toucher les parois intérieures du cylindre par tout son contour, et devant, en glissant facilement le long de ces parois, garnir habituellement d'étoupes fortes. Ces étoupes donnent au contour du piston un degré de compressibilité et d'élasticité qui permet de s'appliquer bien exactement au corps de pompe, sans cependant occasionner un trop grand frottement pendant qu'il fonctionne. Lorsqu'un piston a fonctionné longtemps, les étoupes, s'étant usées, ne remplissent plus leur objet ; elles laissent un certain jeu entre elles et le corps de pompe. On est obligé alors d'ajouter de nouvelles étoupes, et bien de faire en sorte que celles qui restent soient en dehors dans tout le contour du piston, afin que ce dernier ait un diamètre convenable. Pour qu'on puisse opérer de cette manière, on forme le piston de deux espèces de disques qui se superposent l'un sur l'autre, et qui peuvent être plus ou moins épais l'un de l'autre, de manière à faire varier l'épaisseur qu'ils constituent : les deux disques, ainsi réunis, laissent autour d'eux une sorte de gorge de poulie, dans laquelle on introduit les étoupes : et c'est en serrant ces deux disques l'un sur l'autre, à l'aide de boulons et d'écrous, qu'on parvient à resserrer les étoupes, de manière à les repousser au dehors, à mesure que la garniture s'use.

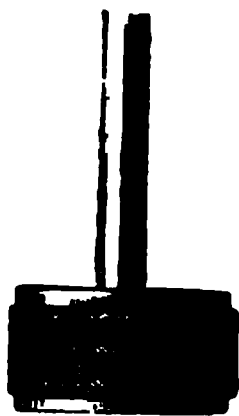


Fig. 410.

Il faut aussi avoir besoin de pratiquer, dans le piston, des ouvertures munies de soupapes, afin qu'il puisse intercepter alternativement une communication entre les deux parties du corps de pompe situées l'une au-dessus et l'autre au-dessous du piston. On perce ordinairement le piston de deux ouvertures placées de part et d'autre de sa tige, et on adapte des clapets, *fig. 411*.



Fig. 411.

On peut diviser les pompes en trois classes, suivant la manière dont le piston agit sur le fluide.

La première comprend les pompes *aspirantes* ; la seconde, les *pompes foulantes* ; et enfin la troisième, les *pompes aspirantes et foulantes*.

Dans une *pompe aspirante*, *fig. 412*, le piston A reçoit un mouvement alternatif, à l'intérieur d'un corps de pompe B, qui com-

muniqué par un tuyau C avec le réservoir d'où l'eau de la machine s'écoule. Une soupape D est établie à l'extrémité supérieure du

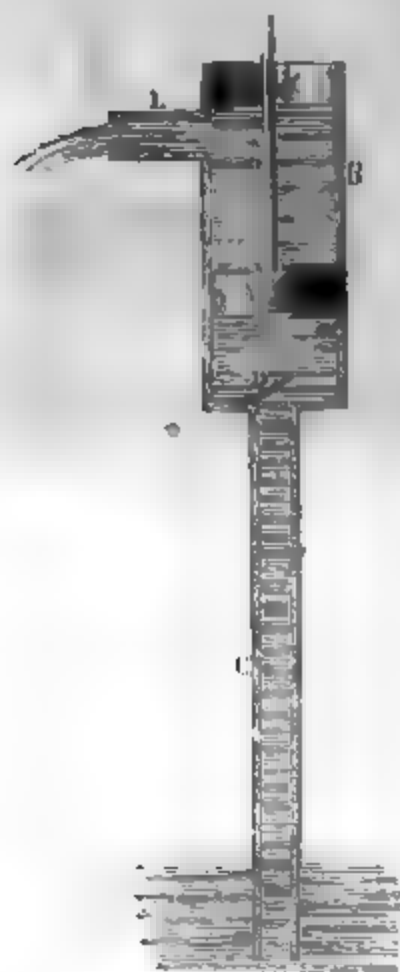


Fig. 412.

s'ouvre de bas en haut; le piston est d'ailleurs percé d'une ou de plusieurs ouvertures, dont chacune est munie d'une soupape. Vers le bas du corps de pompe existe un tuyau latéral E, par lequel s'écoule l'eau qui fournit la machine.

Supposons que la pompe est en mouvement et voyons de quelle manière l'eau est élevée par le mouvement du piston. Si le piston se déplace vers le haut, les soupapes dont il est pourvu se ferment, et la communication entre le haut et le bas du corps de pompe se trouve interceptée; il se crée ainsi un vide au-dessous du piston, et l'eau monte ainsi par aspiration de telle manière qu'elle reste en contact avec sa face inférieure; en même temps il élève l'eau au-dessus de sa face supérieure, et la fait couler par le tuyau latéral E. Ce mouvement ascendant du piston et la soupape D reste constante. Si ensuite le piston s'abaisse, l'eau s'est élevée dans le corps de pompe et tend à redescendre d'aspiration C; mais la

soupape se ferme; et l'eau, ne trouvant plus d'issue de ce côté, passe au-dessus de lui en se pressant. Un nouveau mouvement ascendant du piston fait monter le tuyau E la masse d'eau qui vient ainsi de se presser contre sa face supérieure; en même temps une nouvelle quantité d'eau monte dans le corps de pompe, par aspiration de C.

Si nous examinons ce qui se passe pendant le mouvement descendant du piston, nous verrons que, puisque les soupapes sont ouvertes, le liquide situé au-dessous de lui se communique librement avec celui qui est au-dessus; et, en conséquence, les pressions qu'il en éprouve de part et d'autre doivent être égales.

entre elles. Il ne peut y avoir de différence entre ces s, qu'en raison de ce que les deux faces du piston ne e même hauteur, et aussi en raison de la difficulté plus nde que le liquide éprouve à traverser les ouvertures ns le piston, ouvertures que l'on fait toujours aussi lar- le. On peut donc regarder le piston, dont le poids agit ens contraire de la résultante des pressions dont nous rler, comme n'ayant aucune résistance à vaincre pour orps de pompe de haut en bas. Mais il n'en est plus de e le piston remonte; il fonctionne alors comme un et supporte des pressions différentes sur ses deux part du liquide. Sur sa face supérieure, il éprouve la osphérique, augmentée du poids de la colonne d'eau ite; sur sa face inférieure, au contraire, il éprouve la sphérique, diminuée du poids d'une colonne d'eau, qui ace pour base, et pour hauteur la distance verticale de à la surface libre de l'eau dans le réservoir d'où l'eau la pompe. Donc la différence des pressions supportées sur ses deux faces, dans son mouvement ascendant, gardée comme égale au poids d'un cylindre d'eau aise la surface du piston, et pour hauteur la distance tuyau E au niveau de l'eau dans le réservoir où l'eau

que pour que la pompe puisse fonctionner, il faut que eure du piston ne se trouve jamais à une distance du au dans le réservoir plus grande que la hauteur de 'eau qui fait équilibre à la pression atmosphérique, st moyennement de 10^m,33 (§ 245) S'il en était autre- e s'élèverait pas jusqu'à la face inférieure du piston : it à une certaine hauteur, soit dans le tuyau C, soit dans ompe, sans suivre le piston dans son mouvement as- rmerait ainsi une sorte de baromètre à eau.

n commence à faire marcher une pompe aspirante, le mpe et le tuyau d'aspiration sont remplis d'air. Les ps de piston ne produisent pas d'écoulement d'eau E; mais ils ont pour effet de retirer l'air intérieur, et cer par de l'eau. Si le piston s'abaisse d'abord, l'air essous de lui, dans le corps de pompe, se comprime; as sortir par la soupape D qui est fermée, il ouvre les piston, et se rend dans la partie supérieure du corps do ston se relevant ensuite, ses soupapes se ferment, l'air *spiration* ouvre la soupape D, et se répand dans le

corps de pompe en se dilatant ; mais la force élastique de cet air diminue en même temps, et il en résulte que l'eau s'élève d'une certaine quantité dans le tuyau C. Le piston descendant dans le réservoir, l'air qui vient de passer du tuyau C dans le corps de pompe traverse le piston, pour se rendre dans l'atmosphère ; puis, lorsque le piston remonte, une nouvelle quantité d'air passe du tuyau C dans le corps de pompe, et l'eau monte encore dans le tuyau d'aspiration. Après quelques coups de piston, l'eau finit par s'élever jusqu'à l'intérieur du corps de pompe ; les dernières portions d'air qui restent au-dessous du piston sont alors expulsées par le mouvement descendant qu'on lui donne, et la pompe commence à fournir de l'eau.

Une fois que la pompe est *amorcée*, comme on vient de l'expliquer, elle reste pleine d'eau, même lorsqu'on cesse de la faire fonctionner ; en sorte que, si l'on veut la faire marcher de nouveau, elle fournit de l'eau dès le premier coup de piston. Cependant, si l'on reste un temps un peu long sans y toucher, il arrive ordinairement qu'elle se vide. Cela tient à ce que les pressions, aux divers points de la colonne d'eau qui est ainsi suspendue au-dessous du piston, sont inférieures à la pression atmosphérique. Cette dernière pression s'exerçant sur toute la surface extérieure de la pompe, il en résulte que l'air s'introduit par toutes les fissures qu'il trouve et pénètre à l'intérieur ; il passe notamment entre le contour du piston et la surface intérieure du corps de pompe. À mesure que de l'air entre ainsi dans la pompe, l'eau s'y abaisse : et au bout d'un temps plus ou moins long, suivant que la pompe est plus ou moins bien construite, elle prend dans le tuyau d'aspiration le même niveau que dans le réservoir où plonge ce tuyau. Nous avons dit que la face inférieure du piston ne devait jamais s'élever, au-dessus du niveau de l'eau dans le réservoir inférieur, à une hauteur plus grande que celle d'une colonne d'eau qui serait équilibre à la pression atmosphérique. Si l'on fait attention à la manière dont le piston fonctionne pour amorcer la pompe, et si l'on tient compte des imperfections qu'une pompe présente toujours, on voit qu'on devra toujours se tenir assez notablement au-dessous de cette limite. L'expérience a fait connaître qu'on ne devait guère donner plus de 8 mètres de longueur au tuyau d'aspiration.

§ 355. Dans la *pompe foulante*, fig. 443, un piston plein A reçoit un mouvement de va-et-vient dans un corps de pompe qui plonge lui-même dans le réservoir où se trouve l'eau à élever. Une ouverture B, pratiquée au bas de ce corps de pompe, est munie d'une soupape qui s'ouvre de bas en haut : c'est par cette ouverture que l'eau du réservoir est puisée. Une seconde ouverture C fait commu-

à bas du corps de pompe avec un tuyau D par lequel l'eau est élevée; cette ouverture est également munie d'une soupape qui permet au liquide de passer du corps de pompe dans le tuyau, mais qui ne le permet pas de revenir du tuyau dans le corps de pompe.

Quand le piston A s'élève, il tend à faire un vide sous de lui; la soupape inférieure ferme, la soupape supérieure, au contraire, et le corps de pompe s'emplit. Quand le piston venant en descendant, la soupape inférieure ferme; l'eau dans le corps de pompe est comprimée; elle ouvre la soupape C, et passe dans le tuyau d'ascension D.

La hauteur à laquelle l'eau peut monter par la pompe foulante, est grande que soit la hauteur à laquelle s'élève l'eau par la pompe aspirante, l'eau pourra être conduite par le tuyau D, pourvu que l'on applique au piston une force suffisante. C'est la différence de pression qui constitue une différence essentielle entre la pompe foulante et la pompe aspirante; puisque cette dernière

peut faire monter l'eau qu'à une hauteur qui ne dépasse une certaine limite.

La force qu'il faut appliquer au piston d'une pompe foulante, pour faire monter dans le corps de pompe, est toujours petite, car la pression qu'il éprouve de la part de l'eau supérieure n'est jamais très différente de la pression atmosphérique.

Lorsque le piston descend, il a à vaincre la pression de l'eau qui est déterminée par la hauteur à laquelle l'eau est élevée; cette pression est égale au poids d'un cylindre d'eau qui a pour base la surface du piston, et pour hauteur la distance de la face inférieure de ce piston au point où l'eau sort par la pompe.

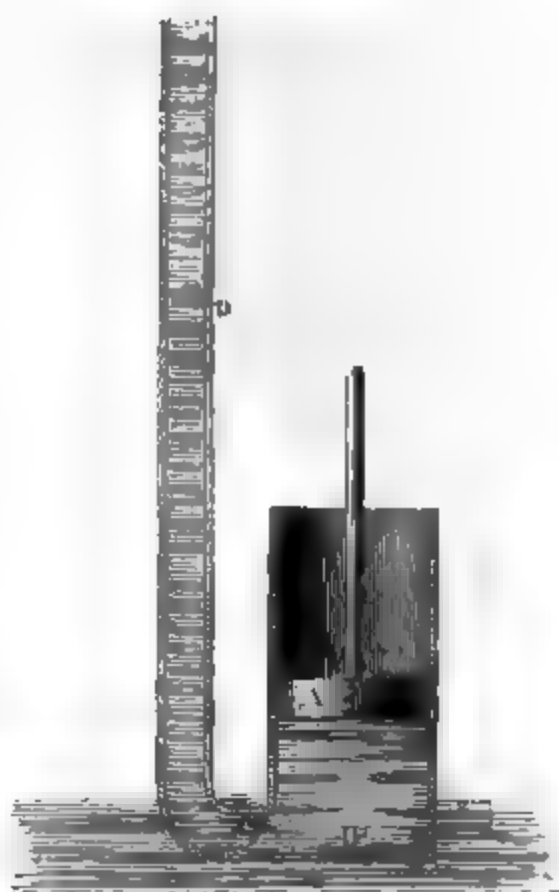


Fig. 413.

§ 356. La pompe aspirante et foulante réunit à elle seule les deux dispositions que présentent les pompes dont nous venons de parler. Concevons que, dans la pompe foulante, fig. 443, le corps de pompe ne soit pas placé au milieu du réservoir d'eau, mais qu'il se trouve plus haut, et qu'il soit muni d'un tuyau d'aspiration, partant de l'ouverture B, et plongeant dans ce réservoir. Lorsque le piston s'élève, il fera monter l'eau dans le corps de pompe par aspiration ; lorsqu'ensuite il s'abaissera, il la refoulera dans le tuyau d'ascension. Tel est le principe de la disposition des pompes aspirantes et foulantes.

Souvent on adopte la disposition de la fig. 442, avec cette différence que l'eau, au lieu de pouvoir s'écouler par un tuyau latéral E fixé au corps de pompe, est obligée de monter dans un tuyau d'ascension. Lorsque le piston s'abaisse, l'eau qui est au-dessous de lui le traverse, pour passer au-dessus. Lorsqu'il s'élève, il agit à la fois en aspirant l'eau du réservoir, pour la faire monter dans le corps de pompe, et en refoulant l'eau qui se trouve au-dessus de lui, pour l'obliger à monter dans le tuyau d'ascension. Les pompes de ce genre sont quelquefois appelées *pompes aspirantes et élévatoires*, ou simplement *pompes élévatoires*, parce que le piston y élève l'eau sur sa face supérieure. Mais ce sont de véritables pompes aspirantes et foulantes, dans lesquelles le piston refoule l'eau en montant, au lieu de la refouler en descendant.

Lorsqu'on établit une pompe destinée à élever l'eau d'un puits, pour des usages domestiques, on place ordinairement le corps de pompe à l'orifice du puits, et l'eau se trouve élevée uniquement par aspiration. Mais il faut pour cela que la profondeur du puits ne dépasse pas 8^m (§ 354). Lorsque la profondeur est plus grande, on est obligé d'installer le corps de pompe dans le puits, et d'employer en conséquence une pompe aspirante et foulante. Dans ce cas, on peut placer le corps de pompe à une hauteur plus ou moins grande au-dessus du fond du puits, pourvu que cette hauteur ne dépasse pas 8^m. On se détermine, dans le choix de la place qu'on doit donner au corps de pompe, par des raisons d'économie dans la construction, et de commodité pour l'installation et les réparations ; quant au travail moteur qui devra être appliqué à la pompe, pour lui faire monter une quantité d'eau déterminée, on sait qu'il ne dépendra aucunement de la place qu'on assignera au corps de pompe dans le puits (§ 349).

§ 357. La fig. 444 représente la disposition qui est la plus adoptée, pour les pompes destinées aux usages domestiques. Un levier ABC peut tourner autour d'un axe B. En élevant et abaissant successivement l'extrémité A, on donne au point C, un mouvement de

ient analogue, mais en sens contraire ; lorsque l'extrémité A

le point C s'abaisse,

vement. Une bielle

articulée d'une part à

mité C du levier, d'une

part en un point D de

du piston E ; en sorte

mouvement de va-et-

tu point C se transmet

on, qui s'élève et s'a-

ainsi successivement

corps de pompe. Lors-

piston E s'élève, les

soupapes F, G, s'ou-

d'un côté, l'eau du puits

uel la pompe est placée

ve aspirée par le tuyau

nonte dans le corps de

: l'eau, qui surmonte

on, est refoulée d'un

ôté par le tuyau I, et

usqu'au point où ce

aboutit. Lorsque le pis-

baisse, les soupapes F,

erment, celle du piston

e, et l'eau qui existe

e corps de pompe, au-

is du piston, traverse

ture de cette soupape

passer au-dessus. On

ie l'on n'a besoin d'ap-

r une force au levier

pour faire marcher

que lorsque le piston

, et par conséquent

el'extrémité A du levier

isse. Cette force doit être

le de vaincre : 1° le poids

colonne d'eau ayant

asse la surface du pis-

t pour hauteur la distance verticale du niveau de l'eau dans

s à l'extrémité supérieure du tuyau d'ascension I, poids qui



Fig. 414.

agit au point C du levier ABC ; 2° les résistances passives occasionnées par le mouvement de l'eau et des parties solides de la pompe. Pour produire le mouvement descendant du piston, on n'a à vaincre que des résistances passives de peu d'importance.

Ordinairement un petit tuyau latéral, muni d'un robinet K, est adapté à la pompe, vers la partie supérieure du corps de pompe. Lorsqu'on ouvre le robinet K, l'eau s'écoule par ce tuyau latéral, sans s'élever dans le tuyau d'ascension L. La pompe devient alors une simple pompe aspirante.

§ 358 Dans les diverses espèces de pompes que nous venons d'indiquer, le mouvement de l'eau est intermittent, soit dans le tuyau d'aspiration, soit dans le tuyau d'ascension. L'eau ne monte dans chacun de ces tuyaux que lorsque le piston marche dans un sens, et elle s'arrête ensuite pendant qu'il marche en sens contraire, pour reprendre son mouvement lorsque le piston recommence à marcher dans le premier sens. C'est ainsi que dans la pompe foulante, fig. 413, l'eau ne se meut dans le tuyau d'ascension que lorsque le piston descend ; elle y reste immobile quand il monte. De même, dans la pompe de la fig. 414, l'eau ne marche dans le tuyau d'aspiration et dans le tuyau d'ascension, que lorsque le piston s'élève, elle s'arrête dans ces tuyaux pendant qu'il s'abaisse. Ce mouvement intermittent de l'eau détermine une perte de travail, qui est due 1° à ce que cette eau doit se mettre brusquement en mouvement après chaque temps de repos, ce qui équivaut à un choc ; 2° à ce que la vitesse que possède l'eau dans les tuyaux est à chaque instant anéantie, sans produire d'effet, et qu'une certaine quantité de travail doit être employée pour donner cette vitesse à l'eau, chaque fois qu'elle se remet en mouvement.

Pour faire disparaître ce mouvement intermittent de l'eau dans les tuyaux d'aspiration et d'ascension, on a imaginé la pompe à double effet, dans laquelle l'eau est aspirée et refoulée en même temps, soit que le piston descende, soit qu'il remonte. Un piston plein A, fig. 415, se meut dans un corps de pompe fermé à ses deux extrémités. Quatre ouvertures B, C, B', C', situées deux au bas et les deux autres au haut du corps de pompe, le font communiquer d'une part avec un tuyau d'aspiration D, et d'une autre part avec un tuyau d'ascension E ; ces ouvertures sont munies toutes quatre de soupapes s'ouvrant dans le sens du mouvement que doit prendre l'eau, pour passer, soit du tuyau d'aspiration dans le corps de pompe, soit du corps de pompe dans le tuyau d'ascension. Lorsque le piston A s'élève, les soupapes B' et C sont fermées, et les autres B, C', sont ouvertes : l'eau monte du tuyau D dans la partie inférieure du

mppe, et celle qui est au-dessus du piston est refoulée
 au E. Lorsque ensuite le piston s'abaisse, les soupapes
 ment, et les autres
 rent; l'eau du tuyau
 n pénètre dans le
 mpe par l'ouverture
 e qui s'est introduite
 ment au-dessous du
 e foulée dans le tuyau
 n par l'ouverture C.
 ie, par là, l'eau est
 en mouvement, soit
 au d'aspiration, soit
 au d'ascension.

mppe à double effet,

OMME NOUS VUONS

er, fournira, à chaque

ston, deux fois autant

ne pompe à simple ef-

ait les mêmes dimen-

s il ne faut pas voir

itage de la pompe à

et; car si elle produit

utile double de celui

roduit l'autre pompe,

côté elle exige une

ouble de travail mo-

ce point de vue, elle

d avantage sur une

imple effet, dont le corps de pompe aurait une capacité
 plus grande. L'avantage de la pompe à double effet con-
 sistent dans la continuité qu'elle donne au mouvement de
 les tuyaux d'aspiration et d'ascension.

mppe à double effet présente une complication qui rend
 du piston et des soupapes plus difficile que dans les pom-
 pe à simple effet. D'ailleurs on arrive tout aussi bien à donner un
 mouvement continu à l'eau dans les tuyaux, en accolant deux pompes
 à simple effet, qui communiquent à un même tuyau d'aspiration et
 à un même tuyau d'ascension, et dont les pistons marchent toujours
 en sens contraire l'un de l'autre; lorsque la première de ces deux
 agit par aspiration, l'autre agit par refoulement, et inver-
 sement. On n'emploie-t-on rarement la pompe à double effet, et la

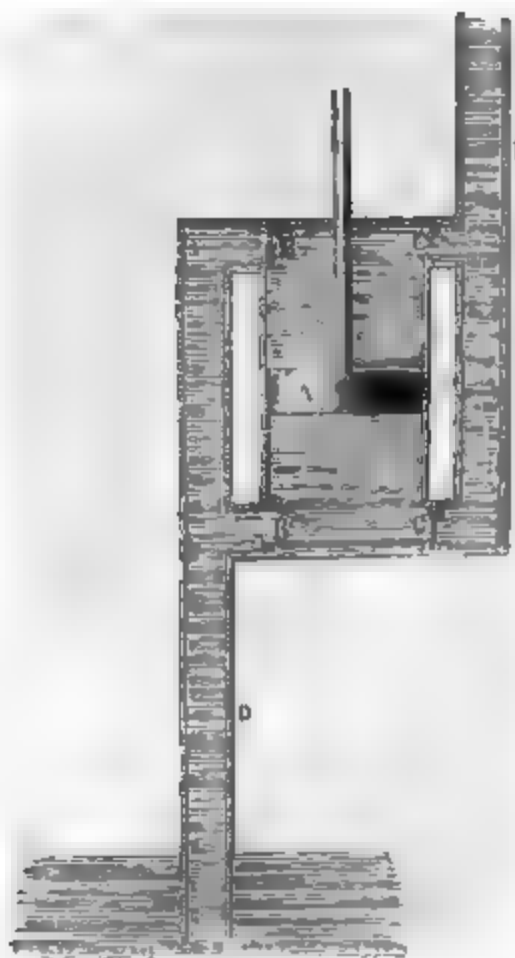


Fig. 415.

remplace-t-on par deux pompes à simple effet, agissant comme on vient de le dire, et mues par un même moteur. Souvent même, pour arriver à une plus grande régularité dans le mouvement de l'eau le long des tuyaux, on réunit trois et même quatre pompes à simple effet, dont les mouvements se contrarient, de manière à rendre sensiblement constante la quantité d'eau qui est aspirée et refoulee à chaque instant.

§ 359. **Pompe à incendie.** — La pompe dont on se sert pour éteindre les incendies est une pompe foulante. Son tuyau d'ascension est très flexible, de manière à pouvoir être dirigé à volonté sur tel ou tel point de l'incendie, pendant que la pompe fonctionne aussi la hauteur verticale à laquelle l'eau est élevée dans ce tuyau est-elle très variable, et souvent même elle devient nulle, parce que l'on place l'orifice de sortie du tuyau au niveau du piston. Mais l'objet qu'on se propose, en manœuvrant, cette pompe n'est pas tant de faire monter l'eau jusqu'à l'extrémité du tuyau d'ascension, que de lui donner une vitesse considérable à sa sortie de cette extrémité ; on produit ainsi un jet d'une grande amplitude, que l'on peut diriger d'un peu loin sur les parties où l'on veut arrêter l'incendie. Nous allons voir quelles sont les dispositions que l'on a adoptées pour atteindre ce but.

Il est très important que le jet qui s'échappe du tuyau en sorte avec une vitesse qui ne varie pas sensiblement d'un moment à un autre. C'est pour cela que l'on dispose, à côté l'une de l'autre, deux pompes foulantes qui marchent alternativement, et qui, par leur ensemble, remplacent une pompe à double effet (§ 358). Les pistons *a, a*, de ces deux pompes, *fig. 416*, se meuvent en même temps, mais en sens contraire ; lorsque l'un d'eux descend, l'autre monte, et inversement. L'eau s'introduit dans chacun des deux corps de pompe par les soupapes *b, b* ; et, lorsqu'elle est refoulée, elle ouvre les soupapes *c, c*, pour se rendre dans un petit réservoir placé au milieu, dans lequel plonge le tuyau d'ascension *d*.

Malgré l'emploi simultané de deux pompes foulantes aboutissant à un même tuyau d'ascension, la vitesse de l'eau serait encore loin d'être régulière à sa sortie de ce tuyau, si l'on n'avait pas recours à un autre moyen ; le mouvement de l'eau se ralentirait d'une manière très marquée, chaque fois que les pistons devraient changer le sens de leur mouvement. Ce moyen de régulariser la vitesse de l'eau consiste dans l'emploi d'un réservoir d'air *e*, placé au-dessus de la capacité où se rend l'eau qui vient des corps de pompe. L'air contenu dans ce réservoir est complètement renfermé ; il se met en équilibre de pression avec l'eau qu'il surmonte, et sa force élasti-

est d'autant plus grande que le mouvement de l'eau dans le tuyau d'ascension exige une pression plus considérable à l'origine de ce tuyau d. Si, à certains moments, l'eau afflue par une des soupapes c, c, avec une grande abondance, elle n'a pas besoin de

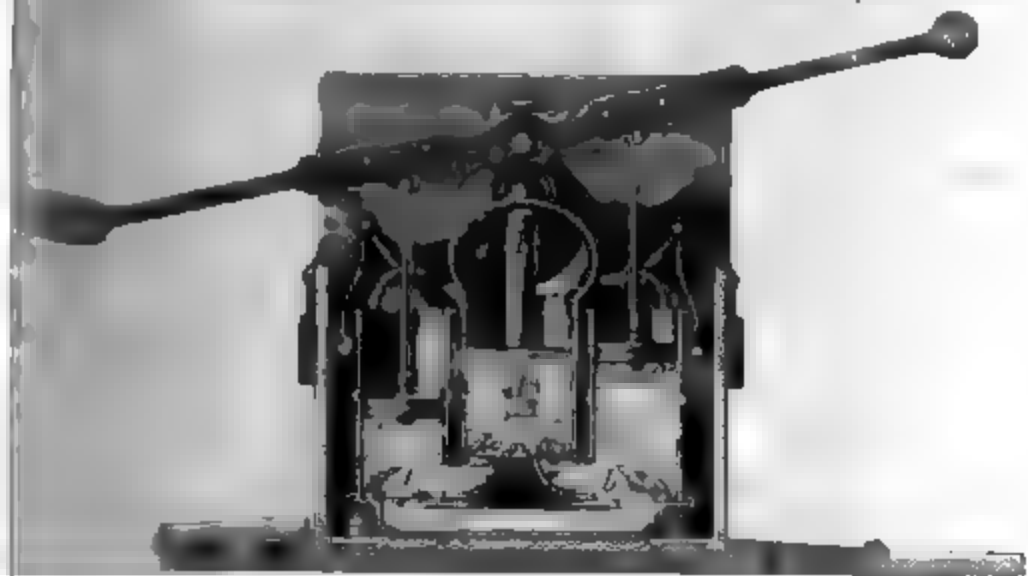


Fig. 416.

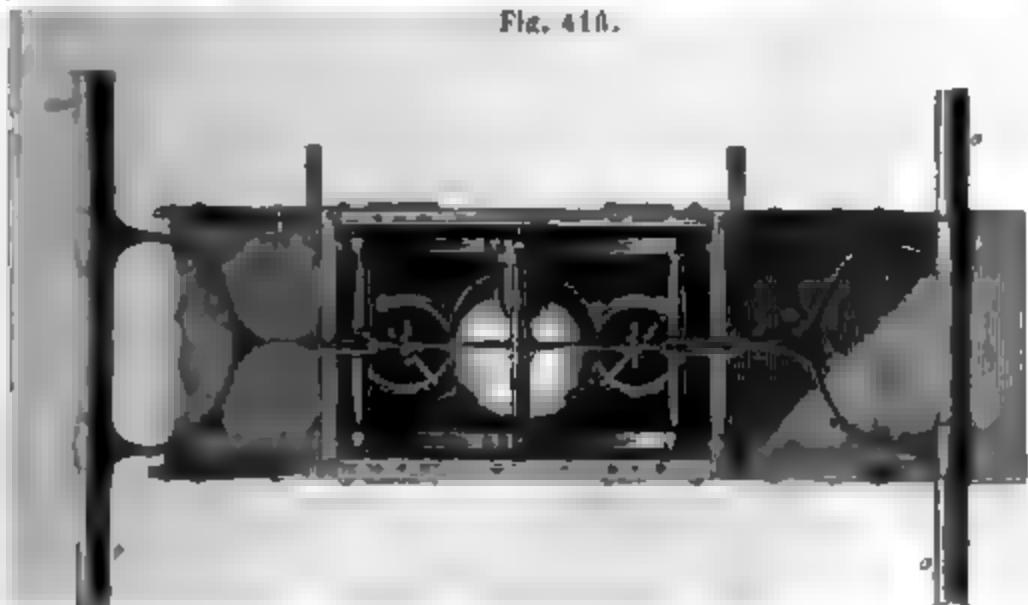


Fig. 417.

passer immédiatement dans le tuyau d; elle s'accumule dans le réservoir où plonge ce tuyau, en comprimant l'air qui le surmonte. puis, lorsqu'il arrive moins d'eau par les soupapes, cet air, en réagissant sur l'eau, la pousse peu à peu dans le tuyau d'ascension. A l'aide de cette disposition, les irrégularités que présente la quantité d'eau foulée à chaque instant à travers les soupapes c, c, se font

principalement sentir dans le réservoir où aboutissent ces soupapes, et s'y traduisent par des oscillations de la surface de l'eau, qui monte et descend alternativement, mais il n'en résulte que des variations très peu sensibles dans la vitesse avec laquelle l'eau jaillit à l'extrémité du tuyau de la pompe.

Pour que l'eau n'ait pas, dans toute la longueur du tuyau, la vitesse avec laquelle elle doit s'en échapper à son extrémité, ce qui occasionnerait des frottements considérables, on a soin de donner au tuyau des dimensions transversales beaucoup plus grandes que celles de l'orifice qui le termine. De cette manière l'eau marche assez lentement le long du tuyau, et ce n'est qu'au moment où elle est au point de sortir qu'elle prend une grande vitesse.

Pour manœuvrer la pompe, on agit aux deux extrémités d'un grand levier ou balancier, qui peut osciller autour d'un axe horizontal placé au-dessus du réservoir d'air *c*, fig. 416 et 417. Ce balancier est traversé à chaque extrémité par un long morceau de bois *o*, qui sert de poignée. Plusieurs hommes saisissent ces poignées, les font alternativement monter et descendre, et ce mouvement d'oscillation est transmis aux pistons *a*, *a*, par l'intermédiaire de tringles de fer qui sont articulées, d'une part à la tige de chaque piston, d'une autre part en deux points du balancier situés de chaque côté de son axe. Pendant que la pompe fonctionne, d'autres hommes ont soin de verser constamment de l'eau dans la caisse ou bûche, au milieu de laquelle sont installés les deux corps de pompe; c'est de cette bûche que l'eau s'introduit par les soupapes *b*, *b*, pour être ensuite refoulée dans le tuyau d'ascension.

§ 360. **Pompe à rotation** — On a cherché à remplacer le mouvement de va-et-vient qu'il

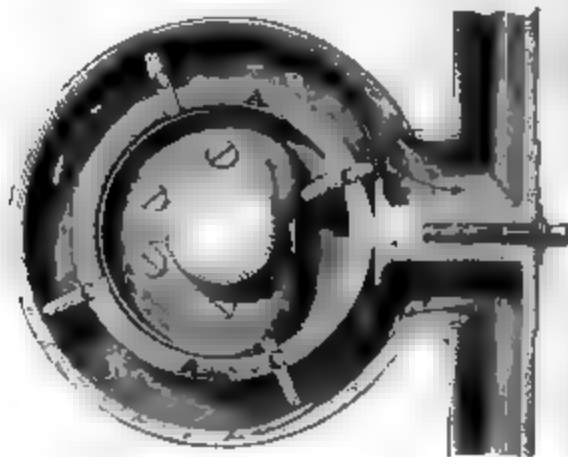


Fig. 418.

faut donner au piston d'une pompe, par un mouvement de rotation s'effectuant toujours dans le même sens, voici la disposition qu'on a imaginée pour cela. Une pièce annulaire *AA*, fig. 418, reçoit un mouvement de rotation autour d'un axe qui correspond à son centre; elle tourne ainsi dans un espace également annulaire *BB*. Cet anneau *AA*

présente quatre échancrures, qui sont traversées librement par un

des C, C, destinées à diviser l'espace BB en compartiments qui n'ont entre eux aucune communication. Les contours extérieurs et intérieurs de l'espace BB, dans lequel se meut l'anneau AA et les pièces C, C, qu'il entraîne avec lui, ne sont pas des circonférences de cercles : ces deux contours, qui sont partout à égale distance l'un de l'autre, se rapprochent du centre de l'anneau AA, dans la partie qui est la plus étroite, de telle sorte que le contour extérieur s'y trouve en contact avec la surface de cet anneau. Cette forme de l'espace BB oblige les pièces C, C, à glisser dans les échancrures de l'anneau AA, de sorte qu'elles se rapprochent et s'éloignent alternativement de l'axe de rotation. Il en résulte que les compartiments qui existent tout autour de l'anneau AA, et qui sont séparés les uns des autres par les pièces C, C, n'ont pas toujours la même capacité : ces compartiments augmentent de grandeur, quand les pièces C, C, qui les terminent, s'éloignent du centre du mouvement, et diminuent au contraire de grandeur, quand ces pièces C, C, se rapprochent de ce centre. Deux ouvertures sont pratiquées dans le contour extérieur de l'espace BB, et correspondent, l'une à un tuyau d'aspiration, l'autre à un tuyau d'ascension. Lorsque, pendant la rotation de l'anneau AA, l'un des compartiments qui l'entourent vient à augmenter de grandeur, ce compartiment communique avec le tuyau d'aspiration par la première de ces deux ouvertures : il aspire l'eau contenue dans ce tuyau, et se trouve ainsi complètement rempli de liquide au moment où il a atteint sa plus grande capacité. Lorsqu'ensuite ce compartiment vient à se rétrécir, il se met en rapport avec le tuyau d'ascension, par la seconde ouverture ; l'eau qu'il contient est donc obligée de se rendre dans ce tuyau, à mesure que la capacité de ce compartiment devient plus petite. On voit, par là, que la pompe dont il s'agit est à la fois aspirante et foulante ; et que, de plus, elle remplit l'objet d'une pompe à double effet, car le mouvement qu'elle donne à l'eau dans le tuyau d'aspiration et dans le tuyau d'ascension est évidemment continu.

§ 361. Pompes de mines. — L'épuisement des eaux des mines se fait, le plus habituellement, au moyen de pompes que l'on installe dans un puits aboutissant au point des galeries souterraines où se trouvent les eaux à extraire. Les puits de ce genre ont souvent une grande profondeur : aussi est-on obligé de donner une disposition spéciale aux pompes qui doivent y fonctionner.

D'après ce que nous avons dit précédemment (§ 355), une pompe foulante pourrait bien faire monter l'eau dans un tuyau d'ascension qui s'élèverait dans toute la hauteur du puits ; mais cela suppo-



parois du corps de pompe aux filtrations autour de ce piston, produire sous la pression terminée par la colonne d'eau. La présence de ces filtrations pourrait favoriser le mouvement du piston en permettant une moindre quantité d'eau de s'échapper lors de l'ascension mais, il faudrait de l'eau élevée par le piston, en ce que la même quantité d'eau serait perdue si elle s'échappait que si elle s'échappait. C'est que l'on n'élève pas l'eau par le piston, dans toute la hauteur, au moyen d'une pompe à eau, mais vers le bas.

La disposition de la pompe consiste à diviser

face du sol, dans le voisinage du puits, et elle fait ainsi fonctionner même temps toutes les pompes qui sont installées dans la hauteur du puits. Le piston B, dans son mouvement de va-et-vient, augmente et diminue alternativement la capacité d'un corps qui communique par un tuyau horizontal avec le bas du CC. Deux soupapes existent dans ce tuyau CC, l'une au-dessous, l'autre au-dessus de sa communication avec le corps de pompe, et s'ouvrent toutes deux de bas en haut. Lorsque le piston B monte, la soupape supérieure se ferme, l'autre s'ouvre, et l'eau du puits monte par aspiration dans le corps de pompe ; lorsque le piston B redescend, la soupape inférieure se ferme, la soupape supérieure s'ouvre, et l'eau est refoulée dans le tuyau de communication CC. Cette eau se rend dans une bêche D', où elle est reçue par le piston B', et refoulée de la même manière dans un autre corps de pompe ; et ainsi de suite, jusqu'à ce qu'elle arrive au haut du puits, où elle s'écoule au dehors.

1. **Pompes de Marly.** — La fameuse machine de Marly, établie sous Louis XIV (de 1675 à 1682), avait pour objet d'élever l'eau de la Seine au haut d'un aqueduc, d'où elle se rendait dans des bûches destinées à alimenter le château et le parc de Marly. Plus tard, l'eau fut conduite jusqu'à Versailles, pour l'usage du château de la ville. La hauteur totale à laquelle l'eau devait être élevée par cette machine était de 455 mètres ; aussi ne chercha-t-on pas à la faire monter, d'un seul jet, de la Seine au haut de l'aqueduc. On établit deux réservoirs intermédiaires, dont l'un était placé vers le milieu de la hauteur du coteau qui s'élève aux bords de la Seine, et l'autre vers le haut de ce coteau, à une certaine distance du pied de l'aqueduc. Trois systèmes de pompes furent établis, l'un au bord de la Seine, les deux autres à côté des deux réservoirs intermédiaires dont nous venons de parler. Le premier système de pompes élevait l'eau de la Seine dans le réservoir placé au pied du coteau ; le second reprenait cette eau pour l'élever dans le réservoir situé vers le haut de l'aqueduc ; et le troisième la faisait passer de ce deuxième réservoir jusqu'au haut de l'aqueduc. Quatre roues hydrauliques (le nombre de ces roues avait été déterminé par Louis XIV, de manière à rappeler le nom de Louis XIV) étaient établies dans la Seine, et y étaient mises en mouvement par la chute d'eau qu'on y avait créée, en construisant un barrage et des digues transversales, de manière à élever le niveau de l'eau en amont. Ces quatre roues, dont chacune avait 42 mètres de diamètre, faisaient fonctionner les trois systèmes de pompes. A cet effet, le mouvement communiqué aux pompes placées près des réservoirs intermédiaires

res, par un grand nombre de longues chaînes formées de fer articulées les unes au bout des autres, qui s'étendaient le long du coteau, moitié jusqu'au premier réservoir, et l'autre moitié jusqu'au second, c'est-à-dire jusqu'au sommet du coteau. Par le mouvement de va-et-vient, que des manivelles adaptées aux roues hydrauliques communiquaient à ces chaînes, donnait un mouvement correspondant des divers pistons, et l'eau était élevée par étages, comme dans les puits de mines, depuis le bas jusqu'au haut de l'aqueduc.

Dans cette machine immense, la plus grande partie du moteur développée par la chute d'eau, et appliquée aux roues hydrauliques, était absorbée par les résistances passives;

les lances n'ont fait que s'affaiblir avec le temps, et elle ne produisait qu'une quantité de travail qui maintenant est remplacée par des pompes auxquelles on a fait élever l'eau, depuis le bord de l'aqueduc jusqu'au sommet de l'aqueduc. La construction de ces pompes, qui remonte aux premières années de l'ère chrétienne, fournit le premier exemple d'élévation de l'eau, d'une aussi grande hauteur que celle en est la disposition.

Un piston métallique, fig. 420, a la forme d'un cône. Sa hauteur est beaucoup plus grande que le diamètre. Il se meut dans un corps de pompe dont il ne touche pas les parois; il ne frotte que sur un disque d'étoupes qui est adaptée à la partie supérieure du corps de pompe. Deux soupapes s'établissent et intercommuniquent la communi-

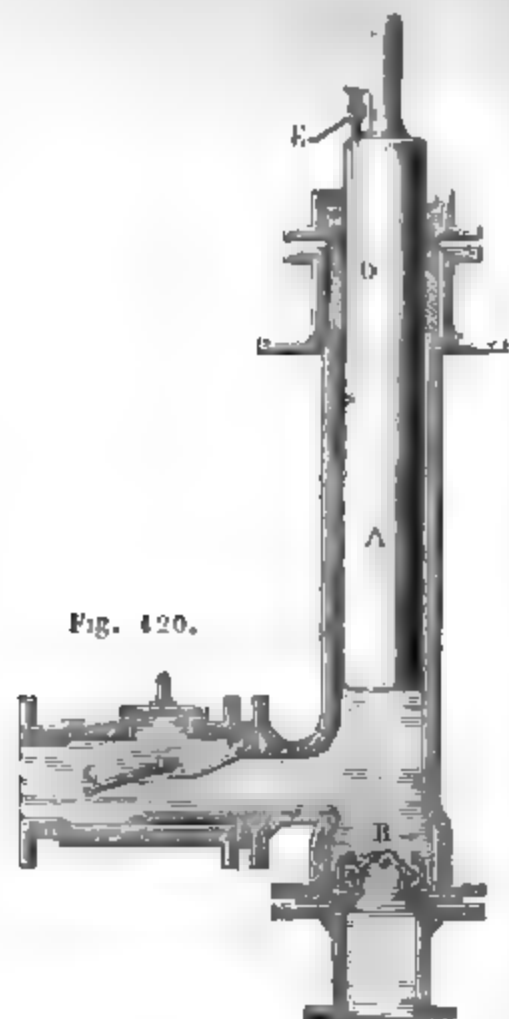


Fig. 420.

corps de pompe avec le tuyau d'aspiration; une autre fait de même communiquer avec le tuyau d'ascension. La

vient du piston donne lieu à des augmentations et à des variations alternatives de la capacité du corps de pompe, tout comme si le piston était garni d'étoupes sur son contour, et contre les parois intérieures du corps de pompe. Lorsqu'il y a aspiration de l'eau par les soupapes B ; lorsqu'il s'ensuit, cette eau est refoulée par la soupape C. La garniture des soupapes, qui est ici adaptée au haut du corps de pompe, peut être facilement entretenue en bon état, que si elle était portée sur le piston et mobile avec lui ; mais cette disposition seule, en elle-même, de laquelle ce système de pompe prend le nom de *pompe à plongeur*, n'aurait pas suffi pour que l'eau pût être refoulée à une hauteur verticale de 455 mètres.

On examine ce qui se passe pendant que la pompe fonctionne. On voit que la pression, dans le corps de pompe, doit être inférieure à la pression atmosphérique, lorsque l'aspiration se produit : au contraire elle doit lui être de beaucoup supérieure, lorsque l'eau est refoulée dans le tuyau d'ascension. Dans le premier cas, l'eau, qui contient toujours une petite quantité d'air en dissolution, doit laisser dégager une partie de cet air : d'ailleurs elle peut aussi amener avec elle de petites quantités d'air qui se trouvent entraînés mécaniquement, sans être dissoutes ; enfin il peut arriver que l'air atmosphérique s'infilte, soit par quelques fissures, soit en passant entre le piston et la garniture d'étoupes. On voit donc que chaque aspiration peut amener de l'air dans le corps de pompe ; cet air se loge dans l'espace annulaire très étroit qui existe entre le piston et le corps de pompe, et aussi au-dessous du piston. Lorsque le piston s'abaisse, l'air contenu dans le corps de pompe commence par se comprimer, et ce n'est que lorsque son volume s'est assez diminué, pour que sa force élastique soit en rapport avec la pression que produit la colonne d'eau du tuyau d'ascension, que l'eau commence à être refoulée à travers la soupape C. On conçoit là que, si l'eau doit être élevée à une très grande hauteur, il peut arriver que le piston ne refoule aucune quantité d'eau dans le tuyau d'ascension. Ou bien encore, si la pompe commence à fonctionner, elle fera d'abord monter de plus en plus le niveau de l'eau dans le tuyau d'ascension : mais il pourra se faire que ce niveau ne s'élève pas au delà d'une certaine limite, située plus bas que le point où l'on veut amener l'eau. Lors même que l'eau pourrait être refoulée jusqu'à l'extrémité supérieure du tuyau d'ascension, la présence de l'air dans le corps de pompe serait encore très nuisible, parce que la quantité d'eau élevée à chaque coup de piston en serait notablement diminuée. Pour se mettre à l'abri de ces gran

548 MACHINES QUI SERVENT À ÉLEVER LES LIQUIDES

inconvenients, on a pratiqué dans le corps du piston un petit conduit D, fermé à sa partie supérieure par un robinet, que l'on ouvre au moyen d'une clef E. De temps en temps on ouvre le robinet, au moment où le piston descend, et l'air qui se trouve comprimé tout autour du piston s'échappe par le conduit D.

Deux des quatorze roues de l'ancienne machine de Marly fonctionnent encore. Chacune d'elles fait mouvoir quatre pompes telles que celle qui vient d'être décrite. Le mouvement est transmis de la roue à ces quatre pompes de manière que le refoulement de l'eau par le tuyau d'ascension unique, auquel elles correspondent, soit régulier que possible. Lorsque l'un des quatre pistons est au commencement de sa course, un second est au bas de la sienne, un troisième au milieu de sa course ascendante, et le quatrième au milieu de sa course descendante. Outre les huit pompes mues par les deux roues hydrauliques, il y en a huit autres qui reçoivent leur mouvement d'une machine à vapeur, établie en 1826, avec un grand succès de construction.

La colonne d'eau contenue dans les tuyaux d'ascension de la machine de Marly produirait, à l'état d'équilibre, une pression de 47 atmosphères. L'expérience a prouvé que la pression que les pistons ont à vaincre s'élève environ à 47 atmosphères : les résistances résultant du mouvement de l'eau dans les tuyaux déterminent une augmentation de 2 atmosphères dans cette pression.

§ 363. **Ponce d'eau.** — Pour évaluer la quantité d'eau que fournit une pompe, on se sert d'une unité particulière, qui porte le nom de ponce d'eau. Imaginons qu'on ait pratiqué, dans la paroi ve-

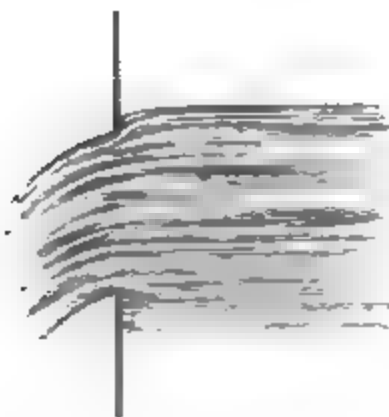


Fig. 421.

d'un réservoir, une ouverture circulaire d'un pouce de diamètre (le pouce est l'ancienne mesure française, valant 25 millimètres); et que le niveau de l'eau dans le réservoir, soit entretenu au-dessus de la partie supérieure de cet orifice (la ligne est la droite qui passe par la partie supérieure du pouce). C'est ce que représente la fig. 421, qui a été construite à l'échelle de 0^m,5 pour mètre. La pompe fournit, dans un temps donné, la quantité d'eau qui s'écoulerait par un, deux, trois orifices de ce genre, placés dans les mêmes

conditions indiquées, on dit qu'elle donne un, deux, trois ponceaux d'eau. Le ponce d'eau ne représente pas un

déterminé de liquide, et c'est pour cela qu'il peut servir de mesure à la puissance d'une pompe, sans qu'on ait besoin d'indiquer le temps pendant lequel on suppose qu'elle fonctionne. Si, au contraire, on voulait faire connaître la puissance d'une pompe, en indiquant le volume de l'eau qu'elle fournit, volume qui pourrait être évalué, soit en mètres cubes, soit en litres, on aurait besoin de dire, en outre, pendant combien de temps la pompe doit fonctionner pour fournir ce volume d'eau. L'expérience a montré que le volume de l'eau qui s'écoule en 24 heures, par un orifice circulaire d'un pouce de diamètre, percé en mince paroi, sous une charge d'une ligne au-dessus de la partie supérieure de cet orifice, est d'environ $19^{\text{m}},2$. On voit, d'après cela, que quand on dit qu'une pompe donne un, deux, trois,.... pouces d'eau, cela signifie qu'elle fournirait en 24 heures une fois, deux fois, trois fois,... $19^{\text{m}},2$ d'eau.

Prony a indiqué une autre disposition, un peu plus commode que la précédente, pour l'orifice à l'aide duquel on peut évaluer le produit d'une pompe. C'est un orifice circulaire de 2 centimètres de diamètre, muni d'un ajutage cylindrique de 17 millimètres de longueur; le niveau de l'eau dans le réservoir doit être maintenu à une distance de 3 centimètres au-dessus de la partie supérieure de l'orifice. La fig. 422, qui représente cette disposition, a été construite à l'échelle de $0^{\text{m}},5$ pour metre. On y voit un repère *a*, fixé à la paroi, et destiné à marquer la position que doit avoir le niveau de l'eau dans le réservoir. La quantité d'eau qui s'écoule en 24 heures, par cet orifice de Prony, est un peu plus grande que celle qui s'écoule par l'orifice de la fig. 421; elle s'élève à 20 mètres cubes. On a conservé le nom de pouce d'eau au produit de cet orifice de Prony, en sorte que le pouce d'eau actuel est un peu plus grand que l'ancien pouce d'eau des fonteniers.

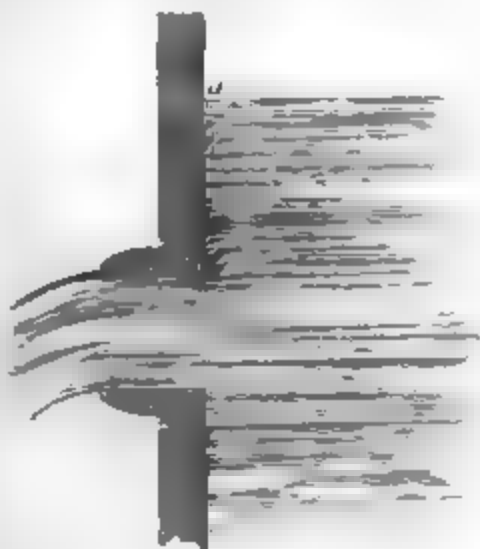


Fig. 422.

§ 364. *Cuvettes de jauge et de distribution.* — Il nous reste maintenant à dire par quel moyen on trouve le nombre de pouces d'eau que fournit une pompe. Pour cela il nous suffira de décrire

520 MACHINES QUI SERVENT À ÉLEVER LES LIQUIDES.

la cuvette de jauge qui est établie au haut de l'aqueduc de Marly et qui est destinée à évaluer le produit des diverses pompes qui élèvent les eaux de la Seine jusque sur cet aqueduc.

La fig. 423 représente le plan de cette cuvette de jauge la fig. 424 en est une coupe faite suivant la ligne GG' du plan.

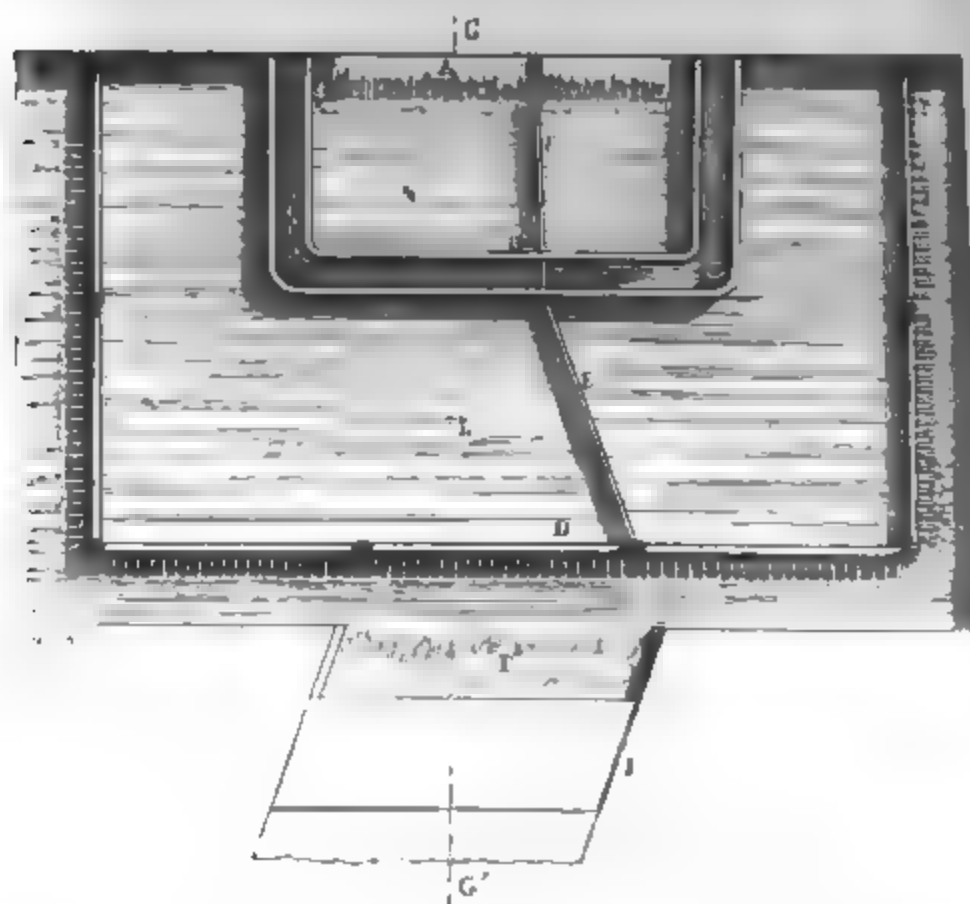


Fig. 423. (Echelle de 20 millimètres pour mètre.)

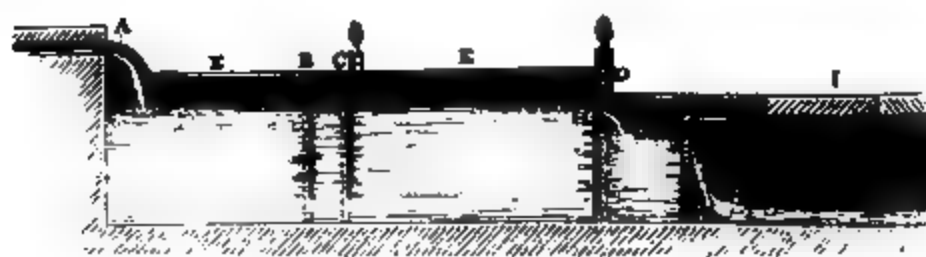


Fig. 424.

élevée par les pompes arrive en A, où elle tombe sous forme de nappe, dans un réservoir rectangulaire. Deux cloisons B. C., enca-

appont la partie N de ce réservoir, sans descendre jusqu'au fond, 424, afin d'empêcher que les mouvements occasionnés sur la surface, par l'eau qui arrive en A, ne se transmettent dans la partie restante L; l'eau se rend de N en L, en passant sous ces deux cloisons, et sa surface libre, dans toute l'étendue de cette dernière partie L du réservoir, est ainsi rendue parfaitement tranquille. La cloison D, qui sert de limite au réservoir, et qui s'étend dans trois directions différentes, porte, dans toute sa longueur, un grand nombre d'orifices H disposés comme celui de la fig. 422; l'eau sort du réservoir par ces divers orifices, et tombe dans une rigole qui existe en dehors de la cloison D, et dans toute sa longueur: de là elle tombe, en F, dans un canal couvert qui la conduit à l'autre extrémité de l'aqueduc. Une cloison EE divise le réservoir LN en deux parties entièrement distinctes, celle de droite reçoit les eaux qui viennent des pompes mues par les roues hydrauliques: celle de gauche reçoit les eaux fournies par les pompes de la machine à vapeur (§ 362). Par cette disposition, les eaux qui viennent de ces deux systèmes de pompes ne se réunissent qu'après avoir traversé les orifices de la cloison D, c'est-à-dire après avoir été jaugées, ainsi que nous allons l'expliquer.

Si l'on suppose que l'eau sorte du réservoir LN, en passant toujours par le même nombre de trous de la cloison D, on conçoit que le niveau qu'elle prendra dans le réservoir sera plus ou moins élevé au-dessus de ces trous, suivant que les pompes fourniront plus ou moins d'eau dans un même temps. En effet ce niveau s'établit de manière à donner au liquide une vitesse d'écoulement, par les orifices, qui soit telle que la quantité d'eau qu'il traverse, dans un temps donné, soit précisément égale à celle que les pompes amènent dans le même temps. Si, au contraire, on ferme un certain nombre des orifices de la cloison D, à l'aide de bouchons de liège, comme on le voit en T, fig. 423, on fera monter en conséquence le niveau de l'eau dans le réservoir LN, pour une même quantité d'eau fournie par les pompes, car, à mesure qu'on diminuera le nombre des orifices d'écoulement, la vitesse avec laquelle l'eau traversera chacun d'eux devra s'accroître, pour qu'il en sorte toujours la même quantité. On peut donc faire varier à volonté la position du niveau de l'eau dans le réservoir LN, en fermant un nombre plus ou moins grand des orifices, et l'on en profite pour faire en sorte que ce niveau coïncide avec un repère fixe à la cloison D, repère que nous avons déjà indiqué précédemment en a, fig. 422. Lorsque cette coïncidence du niveau de l'eau avec le repère est établie d'une manière permanente depuis quelque temps, il suffit de compter les

trous qui restent ouverts, pour avoir immédiatement le nombre de pouces d'eau que fournissent les pompes.

Dans la cuvette de jauge de l'aqueduc de Marly, la partie du réservoir qui sert à jaugeer les eaux amenées par les roues hydrauliques est munie de 60 orifices, la partie qui correspond aux eaux fournies par la machine à vapeur, en contient 90. Si l'on trouvait, par exemple, que les pompes mues par les roues hydrauliques élèvent 60 pouces d'eau sur l'aqueduc, ce qui doit avoir lieu lorsqu'elles fonctionnent bien, cela voudrait dire qu'elles y élèvent 60 fois 24 mètres cubes, ou 1200 mètres cubes d'eau, en 24 heures. On calculera sans difficulté le nombre de chevaux-vapeur qui correspond à ce travail utile, en observant que la hauteur à laquelle l'eau est élevée est de 155^m. En effet, le travail utile, produit en 24 heures, sera égal à 186 000 000^l^m; en une seconde, il sera 2136^l^m, donc il correspond à une force de 28,7 chevaux-vapeur. La force réunie des deux roues hydrauliques, qui font marcher les pompes à Marly, doit représenter un plus grand nombre de chevaux-vapeur, en raison des pertes de travail de toutes sortes qui existent dans de semblables machines, et qu'il est impossible de faire disparaître complètement.

La distribution des eaux entre les divers quartiers d'une ville, et même entre les divers particuliers qui ont des concessions d'eau, se fait à l'aide de cuvettes entièrement analogues aux cuvettes de jauge. Toute la masse d'eau à distribuer se rend dans un réservoir, d'où elle sort par des orifices pratiqués sur tout son contour, et l'on dispose les tuyaux ou conduits entre lesquels doit se fractionner cette masse d'eau, de manière que chacun d'eux reçoive l'eau qui s'écoule par un nombre déterminé des orifices.

§ 363 **Divers systèmes de lampes.** — On a imaginé un grand nombre de dispositions différentes pour les appareils d'éclairage, auxquels on donne le nom de *lampes*. Nous allons faire connaître les principales; on y verra une application d'un assez grand nombre des principes que nous avons étudiés jusqu'à présent.

Dans les lampes, la lumière est produite par la combustion de l'huile. Pour opérer cette combustion, on emploie une mèche de coton, que l'on fait plonger en grande partie dans l'huile; la portion de la mèche qui sort du liquide s'en imbibe complètement par un effet de capillarité, et c'est à cette portion que l'on met le feu. A mesure que l'huile se brûle, la capillarité en fait monter de nouvelles quantités, et la mèche ne se charbonne que dans une très-petite étendue. Pour activer la combustion, et obtenir une lumière plus vive, on donne à la mèche la forme d'un cylindre creux, et on

il dans l'espace annulaire compris entre deux tuyaux con-
es de fer-blanc; l'huile est amenée dans ce même espace
a, et s'y élève jusqu'à la partie supérieure de ces deux
la mèche, qui plonge ainsi dans l'huile, monte un peu plus
lorsqu'on y met le feu, elle brûle sur tout le contour de son
érieur. On dispose en outre, autour du bec de la lampe, un
verre qui s'élève à deux ou trois décimètres au-dessus du
se fait la combustion; ce tuyau fait fonction de cheminée
et, en raison de la température élevée qui s'y développe,
duit à son intérieur un courant ascendant très rapide qui
constamment de l'air sur la flamme, tant par l'intérieur du
est creux, que par tout son contour. Ordinairement la che-
e verre que l'on adapte à un bec de lampe se rétrécit brus-
à une faible distance de sa base; ce rétrécissement est
à changer la direction des divers filets gazeux, qui sans cela
raient verticalement, et à les projeter sur le contour exté-
la flamme.

sposition qui vient d'être indiquée est adoptée dans toutes
es qui sont destinées à produire une lumière un peu vive.
rence entre les diverses espèces de lampes consiste essen-
nt dans le moyen employé pour amener l'huile jusqu'à la
upérieure du bec; la variété des procédés imaginés pour y
tient à la difficulté qu'on a rencontrée pour remplir cet
une manière convenable. Il faut, en effet, satisfaire aux
ons suivantes: 1° entretenir constamment l'huile dans le bec,
au de son extrémité supérieure; 2° éviter que l'huile, en
ant tout autour du bec, ne puisse se répandre au dehors et
objets qu'elle atteindrait: 3° faire en sorte que la lumière
se répandre dans toutes les directions possibles autour du
éviter en conséquence les dispositions dans lesquelles cer-
parties de la lampe pourraient intercepter la lumière, et
r de l'ombre sur les corps environnants. Nous allons voir
nt on est parvenu à satisfaire plus ou moins complètement à
erses conditions.

6. La fig. 425 représente une lampe dans laquelle le niveau
ile s'établit dans le bec, en vertu du principe de l'équilibre
ides dans des vases communicants (§ 228). L'huile est con-
lans un réservoir aa, en forme de couronne; deux conduits
à b, b, l'amènent à la partie inférieure du bec, qui est dis-
manière à occuper le centre du réservoir. On voit en c une
ire, habituellement fermée par un bouchon, qui sert à l'in-
ion de l'huile dans le réservoir. Un petit cône d, présentant

un trou à son sommet, permet à l'air atmosphérique d'exercer librement sa pression sur le liquide. D'après cette disposition, le niveau

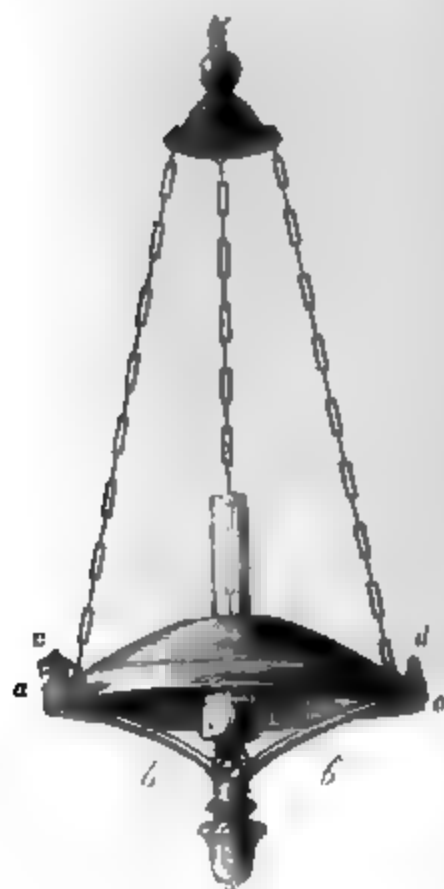


Fig. 425.

de l'huile dans le bec est toujours à la même hauteur que dans le réservoir *aa* ; il baisse donc plus en plus, à mesure que l'huile se brûle. C'est pour cela qu'on donne au réservoir de très petites dimensions dans le sens vertical, et qu'on l'a surtout étendu dans le sens horizontal. Il en résulte que le niveau ne varie réellement pas, et une grande quantité dans le bec. Lorsque le réservoir est plein, le liquide doit monter jusqu'à la partie supérieure du bec ; il baisse à mesure que le réservoir se vide, mais le contact du métal empêche que la flamme descende en même temps le long de la mèche, et par suite l'intensité de la lumière produite doit diminuer progressivement.

Un godet est adapté à la partie inférieure du bec, pour recevoir les petites quantités d'huile qui peuvent s'écouler au dehors. Plusieurs trous sont pratiqués au haut de ce godet, sur tout son con-

tour, pour que l'air puisse s'introduire à l'intérieur, de manière à monter dans le bec, et à venir passer au milieu de la flamme. La forme du réservoir *aa*, et sa position par rapport au bec, font qu'il n'empêche nullement la lumière de se répandre librement sur les objets qui sont placés au-dessous du niveau de la lampe. Les conduits *b, b*, peuvent seuls gêner sous ce rapport ; mais ils sont très étroits, et il n'en résulte pas d'inconvénient. Cette espèce de lampe, quant à sa disposition, convient donc très bien pour éclairer des tables de travail, et en général dans tous les cas où l'on a besoin de répandre la lumière sur les objets placés dans la partie inférieure d'une chambre : mais elle a le désavantage de ne pas fournir une lumière d'une intensité constante.

§ 367. On a cherché à faire disparaître l'inconvénient qui résulte

ont progressif du niveau de l'huile dans le bec, en moyen indiqué précédemment (§ 258), pour rendre ce

t. La fig. 426 représente une lampe construite d'après

le vase *a*, qui a

le flacon *a* une

est placé à l'inté-

rieur vase *b*, cy-

ne le premier,

est le haut. Le

inverse, c'est-à-

l'ouverture est

en bas; il s'appuie

sur un moyen d'un

sur lequel il est muni,

autour du bord

du vase *b*. L'huile,

roduite primiti-

vement ne peut pas en-

trer, parce que

au-dessus de sa

se communique

avec l'atmosphère : elle

ne peut donc pas

monter dans le ré-

servoir tant que le ni-

veau n'est abaissé dans

le vase *b* pour permettre

à l'air d'entrer par

le vase *a*. On voit

de cette manière, on ob-

tient un constant de

niveau du résér-

voir et l'ouverture

prévue dans la paroi de ce réservoir, permet d'ailleurs

à l'air d'y entrer librement; en sorte que la surface

de l'huile est soumise à la pression atmosphérique. Un tuyau

horizontal du réservoir *b* au bec, dont l'extrémité se trouve

à l'extérieur *cc'* passant par les bords de la tubulure du

bec. Pour faire monter de l'huile dans le vase *a*, on le retire de l'inté-

rieur vase *b*, et on le retourne afin de placer la tubulure

en haut; on l'emplit alors d'huile, puis on le renverse de nou-

veau et on le remplace comme il était. Un petit disque métallique,

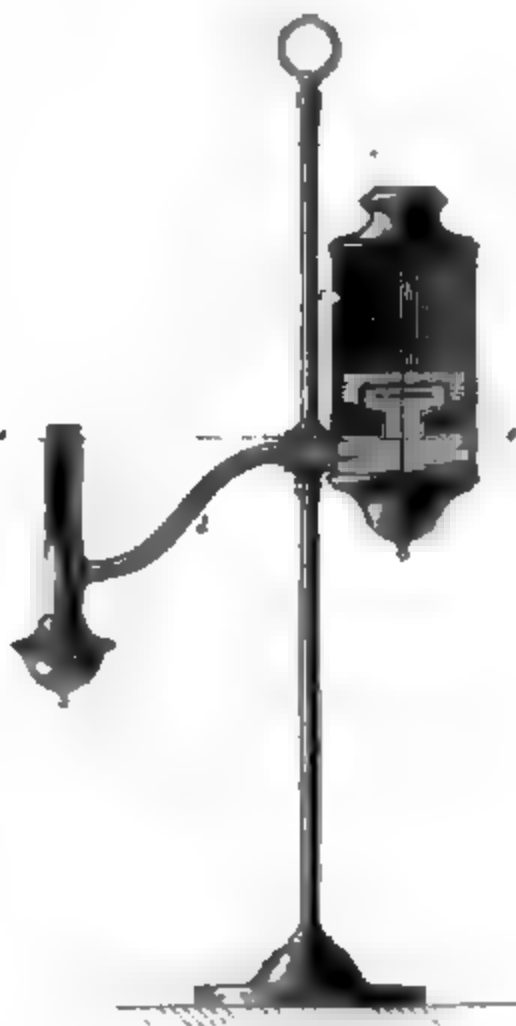


Fig. 426.

faisant fonction de soupape, vient s'appliquer contre l'ouverture intérieure de la tubulure, pour empêcher l'huile de sortir, va le vase *a* qu'on enlève le vase *a* pour le remplir, soit lorsqu'on le remplace après l'avoir rempli. Cette soupape est munie d'une tige un peu longue, qui vient s'appuyer sur le fond du réservoir *b*, lorsque le vase *a* y est introduit, de manière à maintenir la tubulure constamment ouverte, et à permettre à l'huile de descendre, en *b*, chaque fois que le niveau s'est suffisamment abaissé. La tige est montée sur une tige, le long de laquelle on peut la faire glisser pour la fixer à telle hauteur que l'on veut; la tige surmonte un large pied, à l'aide duquel on peut poser la lampe sur une table.

Cette lampe satisfait bien à la condition d'entretenir l'huile constamment à la même hauteur dans le bec, et par conséquent de donner une lumière d'une grande régularité, mais elle présente deux inconvénients. Le premier consiste en ce que le réservoir *a* étant placé d'un côté du bec, projette son ombre sur les objets situés de ce côté. Le second tient à ce que, la lampe étant portable, la horizontalité de la ligne *ce* n'est pas toujours maintenue, pour peu que la lampe penche du côté du bec, soit qu'on la transporte, soit qu'elle repose sur une surface légèrement inclinée, l'huile déborde au haut du bec, vient remplir le godet qui est placé au-dessous, et finit par se répandre au dehors.

§ 368. La disposition la plus avantageuse qu'on puisse donner à une lampe est évidemment celle dans laquelle le bec serait placé verticalement au-dessus du réservoir, et à telle hauteur qu'on voudrait. En effet, on éviterait par là d'avoir latéralement des corps qui s'opposent à ce que la lumière se répande dans toutes les directions et d'un autre côté, l'huile qui déborderait tout autour du bec pourrait retomber dans le réservoir, ou bien encore dans une capacité spéciale assez grande pour qu'il n'y ait pas à craindre qu'elle ne se répande au dehors. Toute la difficulté que l'on rencontrera pour réaliser cette disposition, consistera à faire monter l'huile du réservoir jusqu'au haut du bec, et surtout à l'y faire monter d'une manière régulière. Nous allons voir quels sont les moyens qui ont été imaginés pour y arriver.

La fontaine de Héron, dont nous avons parlé précédemment (§ 297), paraît éminemment propre à atteindre le but que nous nous proposons en ce moment; on voit, en effet, qu'elle permettrait de faire monter de l'huile dans un bec qui serait isolé au-dessus du corps de la lampe. Mais si l'on examine attentivement cet appareil on verra qu'il serait loin de satisfaire aux conditions que doit remplir une bonne lampe. Pour nous en rendre compte, admettons

pe soit disposée comme le tube ABC de la fig. 377 (page 526) le bec, dans lequel l'huile du réservoir C sera poussée par une d'huile AB, soit assez élevé pour que le liquide s'y trouve en équilibre, sans s'écouler par son extrémité supérieure. A mesure que l'huile brûlera vers le haut du bec, les surfaces libres des A, B, C, se déplaceront; le niveau baissera en A et en B, et augmentera au contraire en C. Pour que l'huile se maintienne toujours à la même hauteur dans le bec, il faudrait que la force élastique de l'air contenu de B en C augmentât, puisque la différence de niveau entre l'extrémité supérieure du bec et de la surface du liquide augmente constamment. Or, cela ne peut pas avoir lieu, puisque la force élastique de l'air est déterminée par la pression de la colonne d'huile ayant pour hauteur la différence de niveau en A et en B, et que cette différence de niveau va en diminuant. On conclut donc que la hauteur à laquelle l'huile brûlera dans le bec sera de plus en plus basse, à mesure qu'il s'en brûlera une plus grande quantité, et que, par suite, la quantité de lumière qu'elle fournira sera loin d'être régulière.

Cependant, si la fontaine de Héron, telle que nous l'avons décrite, ne peut pas atteindre tout ce que l'on se propose, il suffit de lui faire subir quelques modifications, pour qu'elle puisse faire monter l'huile toujours à la même hauteur dans un bec de lampe. C'est ce que montre la fig. 427. Trois compartiments A, B, C, sont fermés de toutes parts, et ne peuvent communiquer, soit entre eux, soit avec l'atmosphère, que par les tubes D, E, F, G. Supposons que l'air ait primitivement introduit de l'huile en A et en B, par un moyen quelconque; la pression atmosphérique s'exerce librement sur l'huile de la capacité B par le tube D; cette huile descend par le tube E, dans la capacité C; l'air situé en C, au-dessus de l'huile, se trouve comprimé, et vient, passant par le tube FF, exercer une pression sur l'huile du réservoir A; enfin cette huile, en raison de la pression qu'elle supporte, s'élève dans le tube G, qui com-

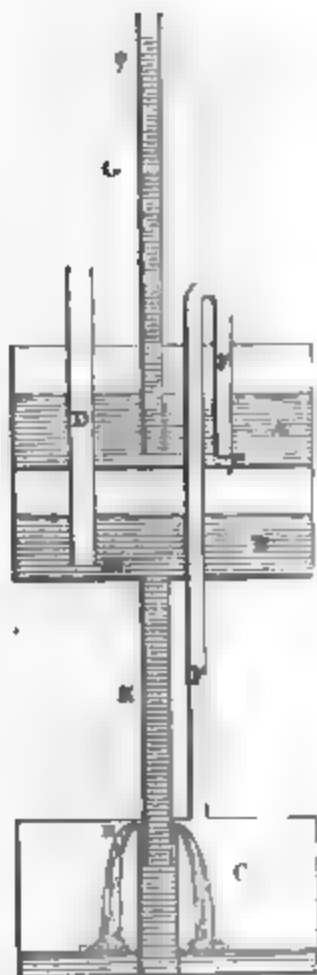


Fig. 427.

communique directement avec l'atmosphère par sa partie supérieure, le tube ti se termine par un bec de lampe, et que l'huile qui y est contenue se brève peu à peu, on voit que le niveau du liquide baïsse en A et en B , et monte en même temps en C , il semble donc que, la différence de niveau en B et en C diminuant, la force élastique de l'air devrait diminuer, et qu'en conséquence, on dans l'appareil de la fig. 377, le liquide doit monter de moins en moins haut dans le tube ti . Mais il faut observer que ce n'est pas sur la surface libre de l'huile en B que s'exerce la pression atmosphérique, cette pression s'exerce à l'extrémité inférieure du tube D . En outre, en raison de ce que le tube E plonge dans le tube plus large placé au milieu du réservoir C et que ce tube large est toujours plein d'huile jusqu'en n , la position du niveau de l'huile en C n'influe pas sur la force élastique de l'air qui l'élève. Cette force élastique doit évidemment surpasser celle de l'air atmosphérique d'une quantité déterminée par la différence de niveau des deux points m et n ; et en conséquence elle ne varie pas avec la position des surfaces libres de l'huile en B et en C (qui se rend dans le réservoir A par le tube FF) y exerce une pression constante: et, comme cette pression s'exerce pas sur la surface de l'huile qui y est contenue, mais bien à l'extrémité inférieure p du tube recourbé FF , il en résulte qu'il faut toujours monter l'huile en q , à une même hauteur au-dessus du point p .

Ces ingénieuses modifications, apportées à la fontaine de Girard pour la rendre applicable à la construction des lampes, ont été imaginées par Girard. Les lampes construites d'après ce principe ont reçu le nom de *lampes hydrostatiques*. Sous le point de vue technique, elles satisfont à toutes les conditions que doit remplir une bonne lampe, mais on les a abandonnées, à cause du peu de commodité qu'elles présentent sous le rapport de l'introduction de l'huile et des nettoyages.

§ 369. Pour faire monter l'huile d'une manière régulière, on place un bec placé au-dessus du réservoir, on emploie maintenant un moteur installé dans le corps de la lampe, soit dans le réservoir d'huile, soit dans le réservoir lui-même. Les premières lampes de ce genre qui aient été construites sont les *lampes Carcel*, ainsi appelées du nom de leur inventeur. Dans ces lampes, un mécanisme d'horlogerie, mû par un ressort tel que celui des figures 226 et 227 (page 233), et dont le mouvement est amplifié par l'appareil à palettes de la figure 229 (page 233), met en mouvement des pompes foulantes qui élèvent l'huile jusqu'à

supérieure du bec. Ces pompes sont d'une espèce particulière. Deux compartiments rectangulaires A, B, *fig* 428, n'ayant aucune communication l'un avec l'autre, forment, proprement parler, les corps de pompe. Deux ouvertures circulaires C, D, sont pratiquées sur l'une des faces de ces compartiments, sont exactement fermées par deux membranes non tendues, qui peuvent en conséquence être poussées vers l'intérieur de ces compartiments, ou bien tirées au dehors. De petits disques métalliques, attachés à ces membranes, sont munis de tiges CE, DF, un levier EF, qui peut tourner au-

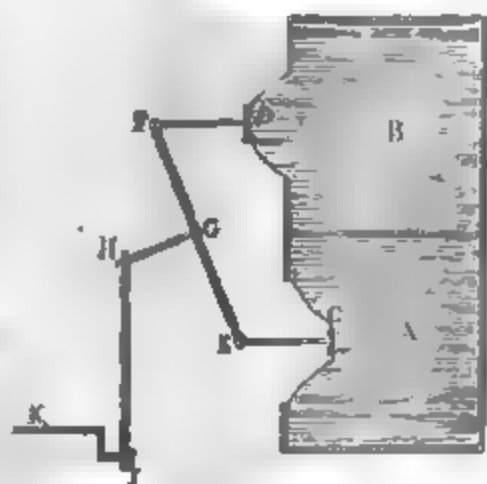


Fig. 428.

tour d'un axe vertical G, est articulé à ses deux extrémités avec les tiges de ces espèces de pistons, un levier GH, fixé au même axe G, est mis en communication avec une manivelle I, adaptée à l'extrémité d'un arbre horizontal K, auquel le mécanisme d'horlogerie donne un mouvement de rotation uniforme. La manivelle I pousse et tire alternativement le levier GH, par l'intermédiaire de la bielle HI; l'axe G, prenant ainsi un mouvement de rotation alternatif, communique un mouvement de va-et-vient aux deux tiges CE, DF; et les membranes C et D sont alternativement poussées à l'intérieur des compartiments A et B, et retirées au dehors. La capacité de chacun de ces compartiments A, B, augmente donc et diminue alternativement, tout aussi bien que si un piston était animé d'un mouvement de va-et-vient à son intérieur, en frottant contre ces parois. Une soupape permet à l'huile du réservoir de pénétrer dans chacun des corps de pompes lorsque sa capacité augmente, lorsque, au contraire, sa capacité diminue, cette soupape se ferme, et l'huile, ouvrant une autre soupape, est refoulée dans un tuyau d'ascension. Le mouvement ascendant de l'huile est sensiblement régulier, en raison de ce qu'il existe deux pompes qui marchent en sens contraire l'une de l'autre, ce qui fait que l'huile est toujours refoulée, soit par l'une, soit par l'autre, dans le tuyau d'ascension commun auquel elles communiquent.

Dans les lampes Carcel, les pompes sont disposées de manière à faire monter plus d'huile qu'il n'en faut pour entretenir la combustion; l'excédant retombe dans le réservoir même ou puissent les pompes.

muniqué librement avec l'atmosphère par sa partie supérieure. Le tube G se termine par un bec de lampe, et que l'huile qui arrive se brûle peu à peu, on voit que le niveau du liquide baisse en A et en B, et montera en même temps en C; il semble donc que, la différence de niveau en B et en C diminuant, la force élastique de l'air intérieur doit diminuer, et qu'en conséquence, dans l'appareil de la fig. 377, le liquide doit monter de moins en moins haut dans le tube G. Mais il faut observer que ce n'est pas sur la surface libre de l'huile en B que s'exerce la pression atmosphérique; celle pression s'exerce à l'extrémité inférieure m du tube D. De même, en raison de ce que le tube E plonge dans le tube plus large placé au milieu du réservoir C, et que ce tube plus large est toujours plein d'huile jusqu'en n , la position du menisque de l'huile en C n'influe pas sur la force élastique de l'air qui la remonte. Cette force élastique doit évidemment surpasser celle de l'air atmosphérique d'une quantité déterminée par la différence de niveau des deux points m et n ; et en conséquence elle ne varie pas avec la position des surfaces libres de l'huile en B et en C. L'air qui se rend dans le réservoir A par le tube FF y exerce donc une pression constante; et, comme cette pression s'exerce, non pas sur la surface de l'huile qui y est contenue, mais bien à l'extrémité inférieure p du tube recourbé FF, il en résulte qu'elle fera toujours monter l'huile en q , à une même hauteur au-dessus du point p .

Ces ingénieuses modifications, apportées à la fontaine de Hém, pour la rendre applicable à la construction des lampes, ont été imaginées par Girard. Les lampes construites d'après ce procédé ont reçu le nom de *lampes hydrostatiques*. Sous le point de vue technique, elles satisfont à toutes les conditions que doit remplir une bonne lampe, mais on les a abandonnées, à cause du peu de commodité qu'elles présentent sous le rapport de l'introduction de l'huile et des nettoyages.

§ 369. Pour faire monter l'huile d'une manière régulière dans un bec placé au dessus du réservoir, on emploie maintenant exclusivement un moteur installé dans le corps de la lampe, soit au-dessous du réservoir d'huile, soit dans le réservoir lui-même. Les premières lampes de ce genre qui aient été construites sont les *lampes Carcel*, ainsi appelées du nom de leur inventeur. Dans ces lampes, un mécanisme d'horlogerie, mû par un ressort tel que ceux des figures 226 et 227 (page 235), et dont le mouvement est régularisé par l'appareil à palettes de la figure 229 (page 238), fait mouvoir des pompes foulantes qui élèvent l'huile jusqu'à la partie

du bec. Ces pompes sont d'une espèce particulière. Deux entons rectangulaires A, B, fig 428, n'ayant aucune communication avec l'autre, forment, pour entrer et sortir, les corps de deux ouvertures circulaires pratiquées sur l'une de ces compartiments, sont alternativement fermées par des membranes non tendues, qui ont pour conséquence d'être refoulées vers l'intérieur de ces entons, ou bien tirées au dehors par de petits disques métalliques attachés à ces membranes, par des tiges CE, DF; un levier, qui peut tourner autour d'un axe vertical G, est articulé à ses deux extrémités avec ces deux especes de pistons, un levier GH, fixé au même axe, est mis en communication avec une manivelle I, adaptée à l'axe d'un arbre horizontal K, auquel le mécanisme d'horlogerie communique un mouvement de rotation uniforme. La manivelle I agit alternativement le levier GH, par l'intermédiaire de la tige HI; l'axe G, prenant ainsi un mouvement de rotation alternatif, communique un mouvement de va-et-vient aux deux tiges CE et DF, et les membranes C et D sont alternativement poussées vers l'intérieur des compartiments A et B, et retirées au dehors. La membrane C, lorsqu'elle est refoulée dans chacun de ces compartiments A, B, augmente donc et diminue alternativement, tout aussi bien que si un piston était en mouvement de va-et-vient à son intérieur, en frottant contre les parois. Une soupape permet à l'huile du réservoir de passer dans chacun des corps de pompes lorsque sa capacité augmente, au contraire, sa capacité diminue, cette soupape se ferme et l'huile, ouvrant une autre soupape, est refoulée dans le tuyau d'ascension. Le mouvement ascendant de l'huile est sensiblement égal, en raison de ce qu'il existe deux pompes qui agissent en sens contraire l'une de l'autre, ce qui fait que l'huile est refoulée, soit par l'une, soit par l'autre, dans le tuyau commun auquel elles communiquent.

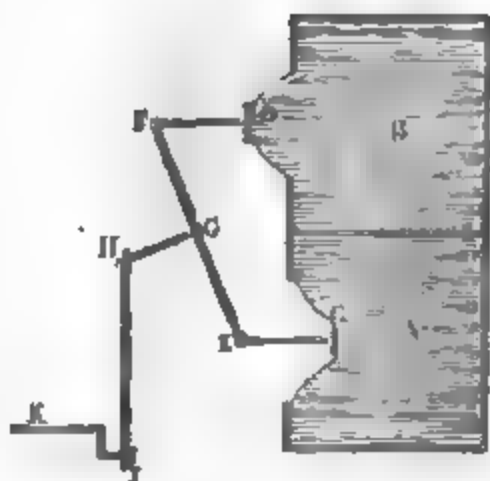


Fig. 428.

Les lampes Carcel, les pompes sont disposées de manière à brûler plus d'huile qu'il n'en faut pour entretenir la combustion, l'excédant retombe dans le réservoir même où puisent les pompes.

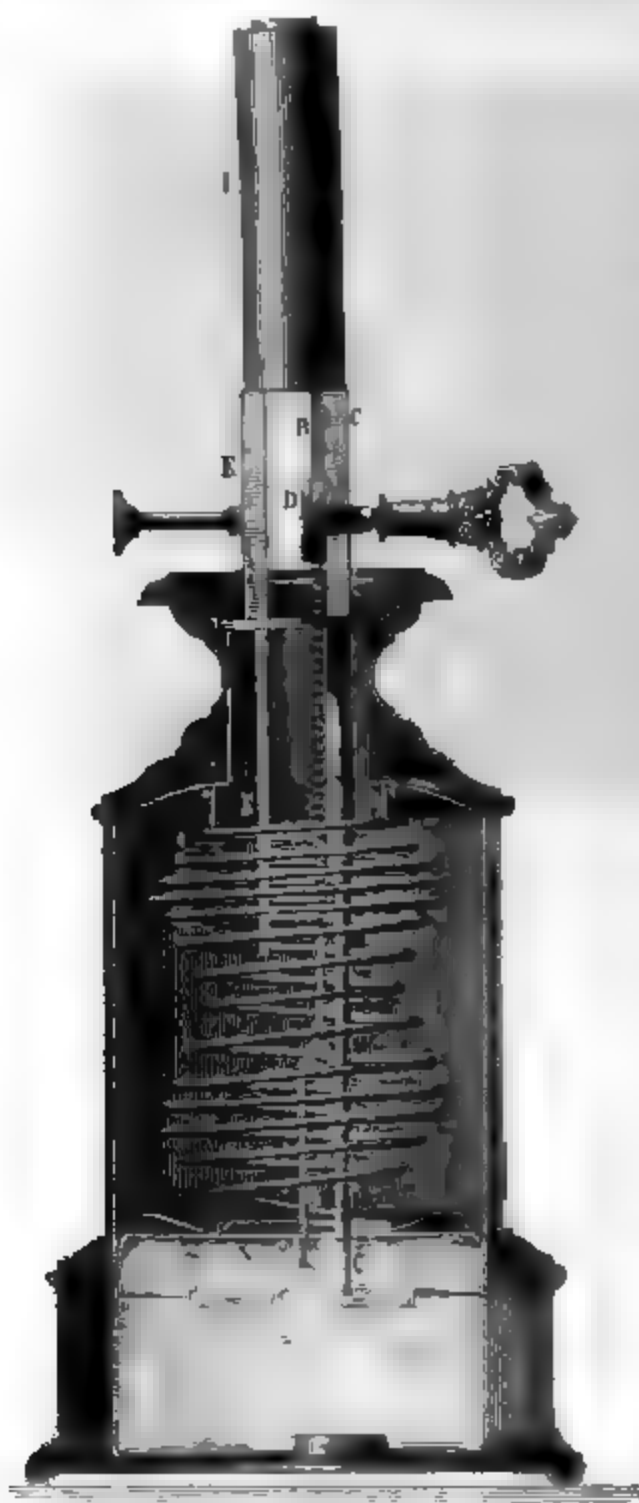


Fig. 420.

qui la conduit jusqu'au bec. A mesure que le piston descend, la tension du ressort diminue, et au contraire la hauteur à laquelle

§ 370 Depuis quel-
ques années on se
sert beaucoup de
lampes dites à res-
sорт. Dans ces lam-
pes, l'huile est relevée
jusqu'au bec par
l'action d'un ressort
moteur, comme dans
les lampes Lamié
mais leur prix est
beaucoup moins éle-
vé, en raison de la
plus grande simplicité
de leur construction.

La fig. 429 repre-
sente une coupe d'une
lampe de ce genre.
Le réservoir inté-
rieur, destiné à conte-
nir l'huile, fait fonc-
tion de corps de pom-
pe. Un piston A est
disposé dans ce réser-
voir, de manière à
s'appuyer contre ses
parois par tout son
contour. Un ressort
en hélice, fixé d'une
part au piston, d'une
autre part aux parois
supérieures du réser-
voir, exerce constam-
ment une pression sur
le piston; cette pres-
sion se transmet à
l'huile située au-des-
sous du piston, et l'o-
blige à monter par le
tuyau d'ascension C.

être élevée augmente ; ces deux causes doivent donc à diminuer progressivement la vitesse avec laquelle menée au bec. Mais, à l'aide d'une disposition particulière parvenu à rendre le mouvement ascendant du liquide écoulement régulier. Voici en quoi consiste cette

d'ascension C est formé de deux parties qui une dans l'autre, *fig. 430*. La partie inférieure est fixée au piston, qu'elle traverse, et descend sous l'action du ressort moteur. La partie supérieure, reste immobile, et sert, pour ainsi dire à l'autre, qui glisse à son intérieur en avançant avec le piston. Une tringle GG, représentée

fig. 431, se trouve placée suivant l'axe du tuyau d'ascension CC, et descend jusque dans la partie inférieure. L'huile, en montant, est obligée de passer dans l'espace annulaire étroit qui existe entre les parois du tuyau d'ascension et le contour de cette tringle ; il en résulte une résistance au mouvement du liquide, et son mouvement ascendant est ralenti. En outre, la tringle GG n'est que faiblement engagée de la même quantité que la plus étroite du tuyau d'ascension, c'est-à-dire dans la partie de ce tuyau qui est en contact avec le piston et qui descend dans le passage étroit qui existe dans la partie inférieure du tuyau, tout autour de la tringle pendant toute sa longueur, d'autant plus grande que le piston est plus élevé, et par conséquent que le ressort est plus tendu. On voit donc que la

tringle GG, opposée au mouvement du liquide, que l'on nomme le *modérateur*, dilate plus, à mesure que le piston descend, et à mesure que la force du ressort décroît, et à mesure que la hauteur à laquelle l'huile doit être élevée va en augmentant ; on conçoit qu'on ait déterminé les dimensions du modérateur, de telle manière que le mouvement ascendant de l'huile soit sensiblement ré-



Fig. 431.



Fig. 430.

l'huile qui arrive au bec ne se brûle pas ; il en retombe une quantité qui vient se placer dans le réservoir, au-dessus

du piston, de manière à baigner les spires inférieures du ressort. C'est aussi dans cette partie du réservoir que l'on introduit l'eau pour remplir la lampe, et alors le ressort est complètement immergé. Supposons qu'on veuille faire fonctionner la lampe, dont le réservoir a été précédemment rempli d'huile, ou bien que cette lampe fonctionnant déjà depuis quelque temps, et le piston s'étant abaissé jusqu'au bas de sa course, on ait besoin de faire passer au-dessus de lui toute l'huile qui le surmonte, et qui est redescendue le soir. Il suffira de tourner la clef qui communique au pignon D, fig. 432. Ce pignon, en tournant, fera monter la tige à crémaillère BB, avec laquelle il engrene, et soulèvera en même temps le piston qui est fixé à cette tige. Les bords du piston sont simplement formés d'une bande de cuir *aa*, qui est recourbée vers le bas, et qui s'applique contre les parois du réservoir, en raison de la pression exercée contre elle par l'huile qui cherche à sortir. Lorsque le piston s'élève, par suite de l'action du pignon D sur la crémaillère BB, il tend à se produire un vide sous sa face inférieure : la pression diminue au-dessous de lui, et l'huile qui le surmonte, pressée par l'atmosphère avec laquelle elle communique librement, fait fléchir la bande de cuir *aa*, pour se rendre dans le compartiment inférieur du réservoir, en passant tout autour du piston.

Le bouton oppose à la clef du pignon D est destiné à faire monter la tige à crémaillère EE, qui sert à élever plus ou moins la meche, à l'intérieur du bec F.

§ 371. **Presse hydraulique.** — Nous avons déjà fait connaître (§ 247) le principe de la presse hydraulique. Occupons-nous maintenant d'indiquer la disposition qu'on donne à cette machine. La fig. 432 la représente dans son ensemble, et la fig. 433 en est une coupe, destinée à montrer les parties intérieures. Un cylindre très-solide A renferme le piston B, auquel on doit appliquer une grande pression par l'intermédiaire de l'eau. Ce piston B porte sur sa tête un plateau C. C'est entre ce plateau, mobile avec le piston B, et le plateau fixe D, fortement relié au cylindre A par les colonnes E, E, que l'on met les corps à comprimer. L'eau est introduite dans le cylindre A au moyen d'une pompe F. Un levier GH, mobile autour du point H, se termine par une poignée G; on le saisit par cette poignée, et on lui donne un mouvement de va-et-vient, en l'élevant et l'abaissant successivement. Ce mouvement se transmet au piston I de la pompe F, dont la tige est reliée au levier GH par une petite bielle articulée, d'une part à ce levier, d'une autre part à la tige du piston. Le mouvement du piston est d'ailleurs guidé par un anneau fixe K, dans lequel se meut librement l'extrémité supé-

de sa tige. A chaque coup de piston, de l'eau est puisée dans le réservoir placé sous la pompe, puis refoulée dans le tuyau L,

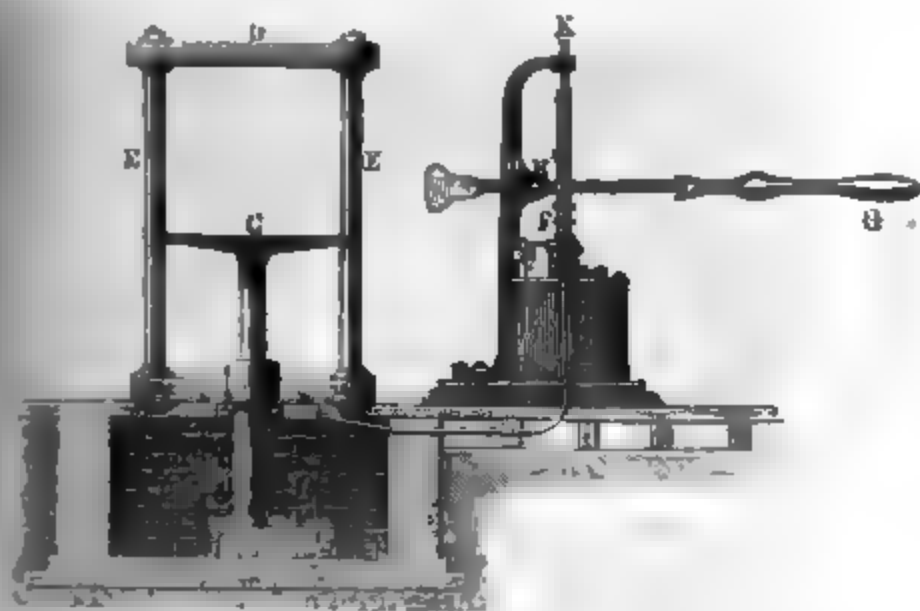


Fig. 432.

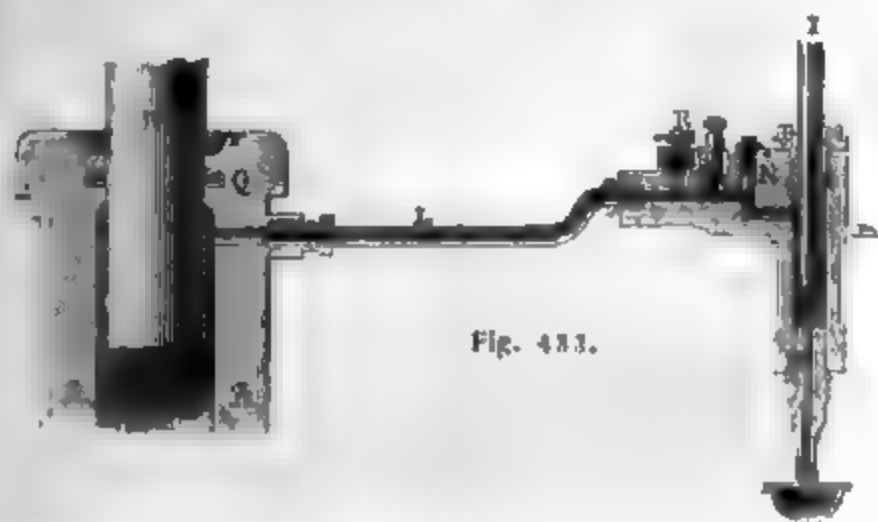


Fig. 433.

qui communique avec le cylindre A. M et N sont les deux soupapes qui établissent et interceptent alternativement la communication du corps de pompe avec le tuyau d'aspiration et avec le tuyau de refoulement L.

. On voit que la pompe F, à l'aide de laquelle l'eau est refoulée dans le cylindre A, est une pompe à piston plongeur, comme celles de Marly, que nous avons décrites précédemment (§ 362). Le cylindre A et le piston B ont aussi une disposition analogue. Pour réa-

liser l'idée de Pascal, qui, comme nous l'avons dit, est l'idée de la presse hydraulique, il y avait à vaincre une difficulté se présente pas au même degré dans la construction de la machine, il fallait trouver le moyen d'empêcher toute espèce de fuite de la surface du piston B, et les portions de parois du cylindre contre lesquelles il frotte en montant. Si il y avait une fuite très petite, la faible quantité d'eau introduite à chaque course du piston I déterminerait la sortie d'une égale quantité d'eau contenue dans le cylindre A, et la pression transmise ne pourrait pas dépasser une limite assez restreinte. La pression rapportée à l'unité de surface est la même sous le piston I, lorsque la soupape N est ouverte, c'est-à-dire quand l'eau est refoulée par le piston I : cependant une fuite se produisant autour de ce dernier piston n'entraînerait aucune conséquence que si elle avait lieu autour du piston B. En effet, que si le mouvement du piston I est un peu rapide qu'il refoule n'aura pas le temps de sortir par la fuite ; nous supposons exister le long de sa surface, et qu'en conséquence de cette eau devra toujours passer de l'autre côté de la soupape N. C'est donc autour du piston B qu'on doit se méfier des fuites avec le plus grand soin, afin que la pression exercée par ce piston puisse être rendue considérable, et aussi la pression persiste lorsqu'on ne manœuvre plus le piston I.

Bramah, ingénieur anglais, est le premier qui soit parvenu (1796) à remplir la condition qui vient d'être indiquée pour construire des machines réellement utiles, d'après le principe de Pascal. Depuis cette époque, la presse hydraulique joue un rôle important dans l'industrie. Le moyen imaginé par Bramah pour empêcher l'eau de passer autour du piston B consiste à équiper ce piston d'une garniture de cuir Q d'une espèce particulière, une sorte de bourrelet formé de la manière suivante : un morceau de cuir en forme de disque circulaire ; on perce au milieu de ce disque, une ouverture circulaire, de manière à laisser qu'un anneau plat ; enfin, après avoir amolli le cuir par un séjour prolongé dans un liquide, on façonne cet an-

neau de manière à refouler ses bords vers l'intérieur, de sorte qu'il donne la forme qui est représentée dans la fig. 434. La pièce de cuir, ainsi façonnée, prend le nom de cuir embouché.

On place vers le haut du cylindre A, dans une cavité circulaire ménagée à cet effet, et l'on introduit le piston B, qui frotte

Fig. 434.

eurs. Lorsque de l'eau est introduite dans le cylindre A, jusque dans la concavité annulaire que présente le cuir tout son contour ; la pression qu'elle exerce contre ces bords contre la surface du piston B, et cela d'augmentement que cette pression est plus considérable, en sorte qu'il ne se produise aucune fuite.

On a placé des corps à comprimer, entre les deux plaques fig. 432, et que l'on manœuvre le levier GH, on n'a qu'à exercer une faible pression sur l'eau ; cette pression mesure que les corps se compriment, et l'on éprouve de plus en plus grande à faire jouer la pompe F. Si la pression qu'on peut ainsi exercer sur l'eau, en agissant sur le levier, n'est pas suffisante pour l'effet qu'on veut obtenir, on retire le boulon H, qui sert de point d'appui au levier, et on le remplace par un autre point d'appui H'. De cette manière on diminue de moitié le bras sur lequel agit la résistance provenant du piston I :

par conséquent, avec une même force appliquée à la manivelle, on exerce une plus grande pression sur le liquide intérieur. Mais comme la pression transmise au liquide ne devienne trop grande, qui pourrait avoir pour résultat de déterminer la rupture de certaines parties de la machine, on dispose près de la pompe une soupape de sûreté, qui est ici représentée à part, fig. 435.

Cette soupape conique O intercepte un conduit par lequel l'eau contenue à l'intérieur de la machine pourrait s'écouler au dehors ; cette soupape est soulevée sur sa tête une pression produite par un poids qui est chargé d'un poids P à son sommet. On détermine d'avance ce poids P, de manière que la soupape O ne cède à la

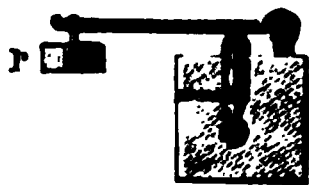


Fig. 435.

liquide que lorsque cette pression dépasse la limite en de laquelle on veut toujours la maintenir.

On se sert de cette vis lors de l'action de la presse. En la faisant tourner dans un sens, on ouvre le conduit qu'elle fermait : l'eau intérieure s'écoule au dehors, et le piston B, n'étant plus soumis à la pression qui lui transmettait le liquide, redescend à l'intérieur du cylindre.

Il faut se demander si, en donnant des formes différentes à la surface supérieure du piston B, on ne ferait pas varier la grandeur de la pression totale qui tend à le soulever. Pour une même

536 MACHINES QUI SERVENT À ÉLEVER LES LIQUIDES

pression appliquée au liquide à l'aide du piston I, produisant un effet sur le piston B, en le terminant inférieurement par une surface concave, qu'en le terminant en pointe ? Si l'on a bien compris les principes relatifs aux pressions qu'un liquide exerce sur les surfaces avec lesquelles il est en contact (§ 220 et suiv.), on n'a besoin que de dire que la pression totale qui tend à soulever le piston B dépend nullement de la forme de la partie de ce piston qui est immergée dans le liquide : elle ne dépend que de la grandeur de la section transversale du piston, dans la partie de sa surface qui est placée au milieu du cuir embouti. Si cette section transversale est 40 fois, 100 fois, 1000 fois plus grande que la section du piston I, la pression supportée par le piston B sera 40 fois, 100 fois, 1000 fois plus grande que celle qu'on applique au piston I à l'aide du levier GH (§ 217). On doit observer que, sous ce rapport, il y a une très grande différence entre les lois des pressions exercées par un corps solide éprouvé de la part d'un liquide en repos, ou d'un liquide en mouvement. Dans ce dernier cas, les pressions peuvent être très différentes, pour des corps de même section transversale, rencontrés par un même liquide animé d'une même vitesse, si les surfaces que le liquide vient rencontrer n'ont pas la même forme (§ 328).

§ 372. La presse hydraulique est très employée dans l'industrie. On s'en sert pour comprimer les draps et les papiers, dans la fabrication des bougies, du vermicelle, etc., etc. En général, quand on a à exercer une très forte pression, on a recours à la presse hydraulique, qui est d'un usage très simple. C'est ainsi que, dans l'établissement impérial de la Chaussée de Noyers, où l'on fabrique des câbles de fer pour la marine, on éprouve les câbles en les soumettant à une force de traction considérable au moyen d'une presse hydraulique.

Nous avons dit (§ 186) que les roues des wagons destinés à rouler sur les chemins de fer sont fixées aux extrémités de l'essieu de telle sorte que chaque essieu et les deux roues qui le terminent soient une seule pièce solide. L'essieu et chacune des roues se construisent cependant à part, et ce n'est que lorsque les pièces sont achevées qu'on les réunit. À cet effet, on a percé aux extrémités de l'essieu pour leur donner une forme très particulière, conique, et l'on a pratiqué dans les moyeux des roues des ouvertures d'une forme exactement pareille à la précédente, destinées à recevoir à leur intérieur les extrémités des essieux. Mais ces pièces sont travaillées de telle manière qu'on ne peut faire entrer les extrémités des essieux dans les ouvertures centrales

appliquant des efforts considérables. C'est encore à la mécanique que l'on a habituellement recours pour exercer

En effet, on a construit en Angleterre un pont tubulaire sur le bras de mer compris entre le comté de Carnarvon et Holyhead. Ce pont, d'une longueur totale de 455 mètres, est formé de deux immenses tubes de tôle, placés à côté l'un de l'autre ; les deux voies du chemin de fer passent entre eux ; il n'est supporté entre ses extrémités que par deux tours, qui le divisent en quatre travées dont les deux plus grandes que les deux autres, ont chacune 140 mètres. Les portions de tubes correspondant à ces travées ont été construites séparément au bord de la mer ; on les a transportées sur des pontons, jusqu'au pied des tours qui soutiennent les piles du pont ; et c'est ensuite à l'aide de presses hydrauliques qu'on a élevé ces tubes gigantesques, pour les poser sur les tours.

EMPLOI DE L'EAU COMME MOTEUR.

Création d'une chute d'eau. — Lorsque nous avons vu les diverses espèces de moteurs (§ 497), nous avons indiqué l'eau comme constituant un moteur de la plus grande importance. Nous sommes en mesure maintenant d'entrer dans les détails convenables, pour faire connaître le mode d'action de ce moteur, ainsi que les dispositions des diverses machines (§ 498) qui reçoivent cette action pour la transmettre à des machines de toute sorte destinées à effectuer du travail utile. Le mouvement de l'eau dans un cours d'eau est dû à l'action de la pesanteur. Chaque molécule liquide, en parcourant une portion de ce cours d'eau, s'abaisse verticalement d'une certaine quantité : ce mouvement donne lieu à la production d'une certaine quantité de travail moteur, qu'on obtiendrait en multipliant le poids de la molécule par la différence de niveau des deux extrémités du chemin parcouru (§ 76). C'est ce travail, développé par l'action de la pesanteur sur les diverses molécules liquides, qu'il s'agit d'utiliser. On ne le laisse pas absorber par le travail résistant qu'occasionne le frottement de l'eau sur elle-même et sur les parois solides ; on le renferme (§ 340). Pour arriver à cela, on établit un barrage à travers le cours d'eau. Ce barrage opposant au passage de l'eau qui arrive constamment dans le cours, on l'a établi, il en résulte que le niveau de l'eau s'élève en amont et s'abaisse en aval. Concevons que le barrage se termine

vers le haut par une crête horizontale, et que l'eau, accumulée dans le bief d'amont, s'écoule dans le bief d'aval par-dessus cette crête, ce qui constituera un déversement, le mouvement s'établira de manière que la quantité d'eau qui passait dans le même temps à travers une section du cours d'eau, avant l'établissement du barrage, d'eau, en passant ainsi du bief supérieur dans le bief inférieur, d'une hauteur égale à la différence de niveau de ces deux biefs, en multipliant cette hauteur par le volume d'eau écoulée, on aura la mesure du travail moteur de la chute du liquide, travail que l'on pourra utiliser, et à une machine.

§ 374. Force d'une chute d'eau. — D'après ce qui a été dit, il est aisé d'évaluer en chevaux-vapeur la force de la chute qu'on produirait dans un cours d'eau d'un certain débit, en y établissant un barrage qui donnerait lieu à une chute d'une hauteur déterminée dans les biefs d'amont et d'aval. Prenons, par exemple, la Seine, à Paris, et cherchons la force de la chute qu'on obtiendrait en construisant un barrage dans le fleuve, un peu au-dessus du Pont-Neuf, comme on le voit sur la figure. Ce bras de la Seine, au moment des basses eaux, débite environ 100 mètres cubes d'eau par seconde. Le barrage dont on se propose la question pourrait donner lieu à une chute de 4^m. Donc cette chute produirait, en une seconde, un travail de 400 kilogrammetres. Si l'on divise ce nombre par 75, la force de la chute qu'on veut créer près du Pont-Neuf est évaluée à 2000 chevaux-vapeur, pour l'époque des basses eaux.

Les éléments qui entrent dans la détermination de la force d'une chute d'eau varient aux diverses époques de l'année. La quantité d'eau que débite le cours d'eau en une seconde est plus ou moins grande, d'une autre part, la différence de niveau entre les biefs d'amont et d'aval diminue à mesure que le débit augmente. Quoique ces deux éléments varient en sens contraire, il en résulte toujours une variation de même sens pour la force de la chute; cette force est d'autant plus grande qu'il y a plus de débit et qu'il y a plus grande quantité de liquide en chute.

§ 375. Conditions que doivent remplir les chutes d'eau. — L'eau d'une chute peut rarement être utilisée sans intermédiaire, pour produire du travail utile; cependant quelques exemples. Le plus ordinairement, on utilise une machine, qui n'a d'autre objet que de recevoir

se mettre ensuite aux machines spéciales qui doivent l'utiliser. Il faut naturellement se proposer de construire cette machine motrice de telle manière que l'eau de la chute lui transmette la totalité du travail moteur qu'elle produit en tombant du bief supérieur dans le bief inférieur. Il est impossible de satisfaire complètement à cette condition ; mais il faut chercher à en approcher le plus possible.

Pour donner une idée nette de la force d'une chute d'eau, nous supposons qu'après avoir construit un barrage en travers du cours d'eau, on laissait l'écoulement de l'eau s'établir naturellement sous la crête du barrage ; en sorte que l'eau tombait librement depuis le niveau du bief d'amont jusqu'à celui du bief d'aval, et que le travail produit par cette chute du liquide qu'il s'agirait de transmettre à une machine motrice. Mais il n'est pas nécessaire que l'eau quitte le bief d'amont à la hauteur de la surface libre du bief qui y est contenu ; on peut pratiquer une ouverture dans le barrage, soit vers le bas, soit en un point quelconque situé entre les niveaux des deux biefs, et la quantité de travail que l'eau est capable de produire, en se rendant ainsi d'un bief dans l'autre, sera toujours la même que si elle tombait librement d'un niveau à l'autre. C'est ce dont on s'assurera sans difficulté, en examinant, par exemple, ce qui aurait lieu, si l'écoulement de l'eau se faisait par l'ouverture d'une vanne située à la hauteur du niveau du bief inférieur ; la vitesse d'écoulement du liquide par cette ouverture serait précisément la même que celle qui aurait été acquise par ce liquide, s'il était tombé librement de toute la hauteur de la chute (§ 235). En sorte que, si l'on ne veut faire agir l'eau sur une machine motrice, qu'après qu'elle aura pris toute la vitesse qu'elle peut recevoir de l'action de la pesanteur, en raison de la hauteur de la chute, peu importe qu'on la fasse arriver d'un niveau ou de l'autre au niveau du bief inférieur, puisque dans les deux cas elle acquerra la même vitesse.

On pourrait objecter, il est vrai, qu'en faisant passer l'eau du bief supérieur dans le bief inférieur, par l'ouverture d'une vanne, on pourrait donner à cette ouverture des dimensions telles qu'il passerait dans un temps donné une quantité d'eau beaucoup plus grande que celle qui se serait écoulée dans le même temps par le barrage ; et que, comme la vitesse du liquide est toujours la même, qui est due à la hauteur de la chute, la quantité de travail produite pendant le temps dont il s'agit aurait été augmentée par l'emploi d'une vanne. Cette augmentation de travail ne fait pas de doute ; mais il faut observer que la vanne, en débitant plus d'eau, n'en fournit le cours d'eau, détermine un abaissement du ni-

veau dans le bief d'amont ; ce bief se vide, et, par conséquent, sera obligé de fermer la vanne pendant quelque temps, afin qu'il se remplisse de nouveau. En somme, si l'on veut régulariser l'action d'une chute d'eau, on devra faire, par exemple, que le niveau du bief d'amont soit le même au commencement de chaque journée : et, par suite, la vanne sera manœuvrée dans l'intervalle de 24 heures, pour toujours laisser passer que la quantité d'eau fournie pendant ce temps. L'emploi d'une vanne laissant varier vers le bas de la hauteur de chute n'augmentera donc point la quantité totale de travail produite par l'eau dans l'espace d'une journée ; mais cela permettra de répartir ce travail autrement qu'il ne se répartirait, si l'eau s'écoulait par le haut du barrage, comme on l'a supposé d'abord. C'est ainsi que, si chaque jour on n'ouvre que 12 heures, au lieu de la laisser ouverte pendant le jour, le travail produit en une heure pourra être doublé, car la force aurait été évaluée à 45 chevaux (§ 374) agissant 12 heures avec une force de 30 chevaux.

Il résulte de ce qui précède que la quantité de travail capable de produire est toujours la même, de quelque manière que l'eau fasse passer du bief supérieur dans le bief inférieur ; pour cela, bien entendu, que les circonstances dans lesquelles se produit cet écoulement ne donnent lieu à aucune perte, car une pareille perte entraînerait nécessairement une diminution dans la quantité de travail que la vitesse peut produire en agissant sur la machine motrice. Il faut donc, en conséquence, disposer les orifices par lesquels l'eau doit passer, de manière à éviter les changements brusques de direction des liquides, c'est-à-dire qu'il faut employer des orifices étroits qui ont doit aussi éviter de faire couler l'eau avec une grande vitesse dans un canal d'une certaine longueur, afin de ne pas occasionner aux pertes de vitesse occasionnées par les frottements sur les parois et sur lui-même (§ 304).

Si nous examinons maintenant la machine motrice, nous voyons que l'eau doit transmettre le travail développé par sa chute, et que l'eau arrive dans cette machine avec une certaine vitesse, qui peut être grande ou petite, suivant les cas, et qu'elle agit ensuite pour se rendre dans le bief inférieur. Sans nous occuper des dispositions diverses qu'on peut donner à une pareille machine, nous indiquons que nous indiquerons en détail dans un chapitre ultérieur, nous pouvons reconnaître qu'en général elle doit satisfaire à trois conditions essentielles. Premièrement, l'eau doit agir sans cesser de

que, depuis le moment où elle est sur le point d'entrer dans la machine, jusqu'au moment où elle l'a abandonnée complètement, ne doit pas y avoir de changements brusques, soit dans la direction, soit dans la grandeur de la vitesse des différentes molécules d'eau. Secondement, l'eau doit sortir de la machine de manière à avoir qu'une très faible vitesse, sinon une vitesse nulle, lorsqu'elle arrive dans le bief inférieur ; car si elle y arrivait avec une vitesse appréciable, elle serait capable de produire une certaine quantité de travail, en raison de cette vitesse, et en conséquence n'aurait pas transmis à la machine motrice la totalité du travail qu'elle pouvait produire.

Ainsi, en résumé, dans l'établissement d'un moteur hydraulique, doit toujours avoir en vue de satisfaire aux conditions suivantes : 1° l'eau doit être amenée du bief d'amont dans la machine, en éprouvant le moins possible de perte de vitesse ; 2° elle doit agir sans choc ; 3° elle doit arriver sans vitesse dans le bief d'aval. Ces conditions ne peuvent pas être remplies d'une manière rigoureuse ; aussi arrive-t-il jamais que la force d'un moteur hydraulique soit la même que celle de la chute qui le fait mouvoir : elle n'en est qu'une fraction plus ou moins grande, suivant que le mode d'action de l'eau s'approche plus ou moins de l'état idéal qui est indiqué par les conditions précédentes. Pour juger de la bonté d'un moteur hydraulique, on déterminera par l'expérience (§ 499) la quantité de travail qu'il est capable de produire dans un temps donné, et l'on cherchera le rapport de cette quantité de travail à celle que fournit la chute d'eau dans le même temps ; le moteur sera d'autant meilleur que ce rapport se rapprochera plus de l'unité.

§ 376. **Roue en dessous, à aubes planes.** — Entrons maintenant dans le détail des diverses dispositions qui ont été imaginées pour les moteurs hydrauliques. Le plus habituellement, ces moteurs ont des roues auxquelles l'eau imprime un mouvement de rotation autour de leur axe, qui est placé, soit horizontalement, soit verticalement ; ces roues prennent le nom de *roues hydrauliques*. Nous commencerons d'abord celles dont l'axe est horizontal. On les divise habituellement en *roues en dessous*, *roues en dessus*, et *roues de côté*, suivant que l'eau arrive dans la roue vers sa partie inférieure, ou vers sa partie supérieure, ou bien en un autre point de son contour. La roue en dessous à aubes planes, *fig. 436*, se place en avant d'une vanne qu'on lève d'une certaine quantité, pour laisser couler l'eau par sa partie inférieure. L'eau sort de la vanne avec la vitesse qu'elle a à la hauteur du niveau dans le bief au-dessus de l'orifice ; un coursier horizontal, ou légèrement incliné, l'amène sous la roue ; et

elle lui imprime un mouvement de rotation, en exerçant une pression sur les aubes ou palettes dont elle est munie sur tout son contour. Sous l'action de l'eau, la roue prend une certaine vitesse, qui, sous des résistances qu'elle a à vaincre, cette vitesse est d'autant plus petite que les résistances sont plus considérables. On sait en effet, que la pression exercée par l'eau sur les aubes de la roue lorsqu'elles sont en mouvement, n'est pas la même que lorsqu'elles sont immobiles, et que, de plus, cette pression est d'autant plus faible qu'elles se meuvent plus rapidement (§ 327. Il en

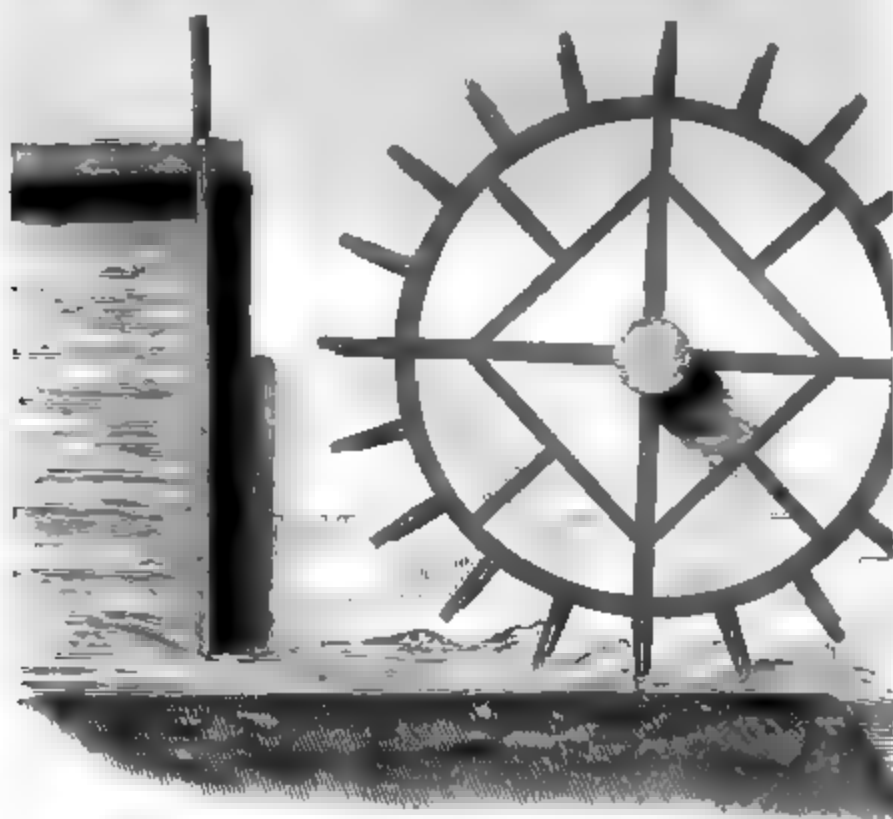


Fig. 435.

que, pour vaincre une résistance donnée, la roue prendra, sous l'action de l'eau, une vitesse particulière, pour laquelle la pression de l'eau sur les aubes soit en rapport avec la grandeur de cette résistance. Si, par une cause quelconque, sa vitesse devenait d'autant plus petite, la pression de l'eau sur les aubes augmenterait; une portion seulement de cette pression ferait équilibre à la résistance, et l'autre portion accélérerait le mouvement de la roue jusqu'à ce que l'équilibre fût rétabli entre la pression exercée par l'eau et la résistance à vaincre. Si, au contraire, la roue prenait momentanément un mouvement plus rapide, la diminution

sulterait dans la pression de l'eau sur les aubes rendrait la résistance prédominante, et le mouvement se ralentirait.

On conçoit, d'après ce qui précède, que l'on puisse faire prendre la roue telle vitesse qu'on voudra, en réglant convenablement la grandeur de la résistance qu'elle aura à vaincre. Mais la quantité de travail réellement transmise à la roue par l'action de l'eau ne sera pas la même, suivant que la roue tournera avec telle ou telle vitesse. Pour que la roue marche très rapidement, il faut qu'elle n'ait à vaincre qu'une faible résistance; si on lui oppose une résistance considérable, elle ne prendra qu'un mouvement très lent. Or, le travail effectué par la roue dans un temps donné dépend à la fois de la grandeur de la résistance vaincue, et de l'étendue du chemin parcouru pendant ce temps, par le point d'application de cette résistance, ou, ce qui revient au même, de la vitesse de la roue. Dans l'un et dans l'autre des deux cas extrêmes qu'on vient de considérer, l'un des éléments du travail est très petit, et, par suite, le travail lui-même ne peut pas être grand. Il doit donc exister une certaine vitesse de la roue, qui ne soit ni trop grande ni trop petite, pour laquelle le travail effectué surpasse celui que la roue produirait avec toute autre vitesse. L'expérience a appris que, pour obtenir ce maximum de travail, il faut que la vitesse de la roue, mesurée à sa circonférence, soit les 0,45 de celle de l'eau, au moment où elle arrive sur les aubes.

Les roues en dessous à aubes planes sont loin de satisfaire aux conditions que nous avons indiquées en général pour les moteurs hydrauliques (§ 375). En premier lieu, l'eau perd une portion de sa vitesse, avant d'atteindre la roue, par son frottement contre les parois du coursier qui l'amène de la vanne sur les aubes; en second lieu, au moment où l'eau rencontre une des aubes de la roue, elle perd brusquement sa vitesse, pour prendre la vitesse de la roue; en troisième lieu, l'eau quitte la roue en conservant une vitesse considérable, qui donne lieu à ce bouillonnement que l'on observe dans le bief d'aval, jusqu'à une grande distance de la roue. Aussi les roues de cette espèce sont-elles de très mauvais moteurs hydrauliques. En mesurant, à l'aide du frein dynamométrique, la quantité de travail transmise par l'eau à la roue, on a reconnu que, lorsque la roue a la vitesse la plus convenable, cette quantité de travail ne dépasse pas les 0,25 de celle qui correspond à la quantité d'eau dépensée; le quart seulement de la force de la chute est utilisé par la roue, et les trois autres quarts sont entièrement perdus.

§ 377. *Roue à augets.* — La roue en dessus, ou roue à au-

fig. 437, est disposée de manière que l'eau soit amenée à sa partie supérieure par un canal qui la prend dans le bief d'amont, au niveau de la surface du liquide dans ce bief. L'eau ne prend dans ce canal que la vitesse nécessaire pour qu'elle puisse atteindre la roue; elle tombe de là dans des compartiments ou *augets* dont la roue est munie sur tout son contour, et les remplit successivement, à mesure que, par le mouvement de la roue, ils se présentent à l'extrémité du canal d'amenée. Lorsque les augets arrivent au bas de la roue, l'eau en sort pour tomber dans le bief d'aval et

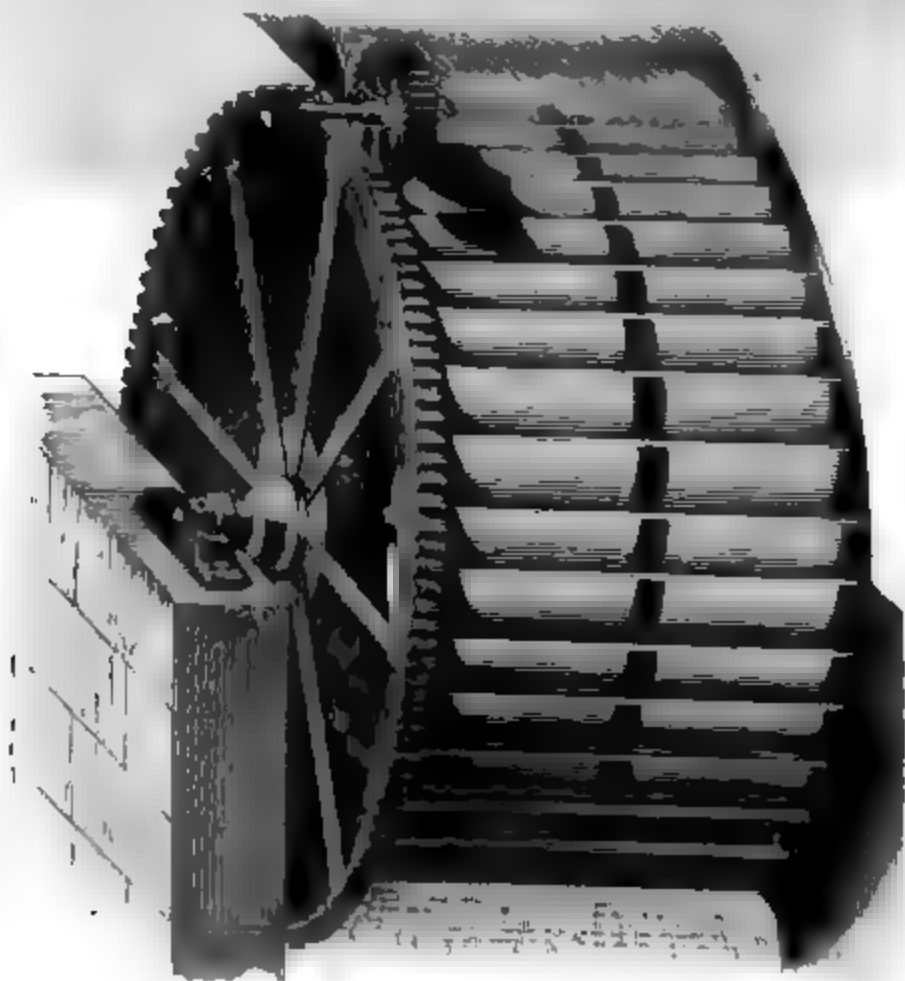


Fig. 437.

ils remontent vides, pour se remplir de nouveau lorsqu'ils seront sur le point de redescendre. On voit, par là, que les augets compris dans la partie descendante de la roue sont constamment pleins d'eau, tandis que ceux qui se trouvent dans la partie ascendante sont vides; c'est le poids de l'eau qui est ainsi contenue dans une roue

de la roue, qui détermine son mouvement et lui fait vaincre des résistances

Dans la construction d'une roue de ce genre, on doit surtout avoir en vue de disposer les augets de manière qu'ils ne se vident que le plus bas possible ; car si l'eau en sort avant qu'ils aient atteint le bas de la roue, il en résulte une perte de travail. Mais il faut, en même temps, que l'ouverture de chaque auget ne soit pas trop étroite, afin que l'eau puisse y entrer et en sortir sans difficulté. Les fig. 438, 439 et 440 montrent des dispositions qui sont fréquem-



Fig. 438.



Fig. 439.



Fig. 440.

ment adoptées. Pour que l'air qui doit sortir de l'auget lorsque l'eau y arrive, ou bien qui doit y entrer lorsque l'auget se vide, ne gêne pas le passage du liquide, ce qui pourrait nuire beaucoup à l'effet produit, on a soin de pratiquer quelques petits trous au fond de l'auget. La présence de ces trous occasionne bien la perte d'une certaine quantité d'eau, qui les traverse et ne reste pas dans l'auget ; mais cette perte est de peu d'importance.

Une roue à augets donne des résultats d'autant meilleurs qu'elle tourne plus lentement, et cela pour plusieurs motifs. D'abord le mouvement de rotation de la roue, auquel participe l'eau contenue dans les augets, détermine une force centrifuge qui modifie la forme de la surface libre du liquide dans chaque auget : cette surface s'abaisse vers l'intérieur de la roue, et se relève vers l'extérieur, de telle sorte que l'eau tend à sortir de l'auget plus tôt qu'elle ne le ferait sans cela. D'un autre côté, l'eau arrivant avec une faible vitesse par le canal d'amenée, ne produira pas de choc à son entrée dans les augets, si la roue ne marche que lentement ; et lorsque les augets se videront, l'eau sera, pour ainsi dire, déposée sans

vitesse dans le bief d'aval. Avec cette condition d'une faible vitesse de rotation, on voit que la roue à augets satisfait beaucoup mieux que la roue en dessous aux conditions générales qu'on doit chercher à faire remplir aux moteurs hydrauliques. Aussi les roues à augets bien établies utilisent-elles les 0,75 du travail moteur développable par l'action de l'eau. Ces roues doivent être employées de préférence à toutes les autres, pour les chutes dont la hauteur est comprise entre 3 mètres et 12 mètres.

Le mouvement de rotation d'une roue à augets devant être lent, on la munit ordinairement d'une roue dentée, qui fait corps avec elle, et qui engrène avec une roue beaucoup plus petite. On transmet ainsi à l'arbre de cette seconde roue un mouvement de rotation aussi rapide qu'on veut.

§ 378. **Roue de côté.** — La roue de côté, fig. 441, est une roue

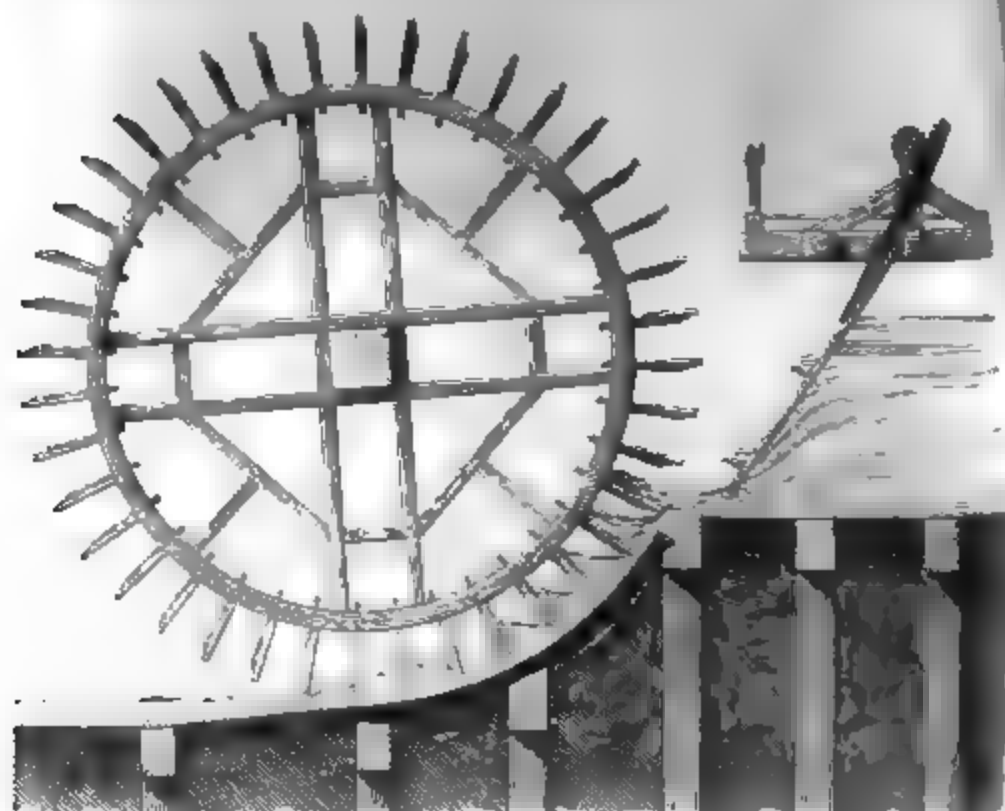


Fig. 441.

à aubes planes qui est emboîtée dans un coursier circulaire, et qui reçoit l'eau à la partie supérieure de ce coursier. Elle tient à la fois de la roue en dessous et de la roue à augets. L'eau agit d'abord sur les aubes par son choc, au moment où elle entre dans la roue ; puis elle est maintenue sur ces aubes par le coursier, qui s'oppose

elle s'écoule de part et d'autre, et elle agit ainsi par son poids jusqu'à ce qu'elle soit arrivée au bas de la roue.

Suivant la disposition de la roue, on peut faire prédominer l'un ou l'autre de ces deux modes d'action de l'eau ; il est clair que, d'après ce que nous avons dit dans les paragraphes précédents, on devra surtout chercher à rapprocher la roue de la roue à augets, qui utilise une bien plus grande portance motrice développée par l'eau que la roue en dessous. Au lieu de donner l'eau à la roue par le bas d'une vanne, on la fait arriver sur les aubes par le haut d'une vanne à coulisse, *fig. 442*, de manière à produire l'écoulement comme

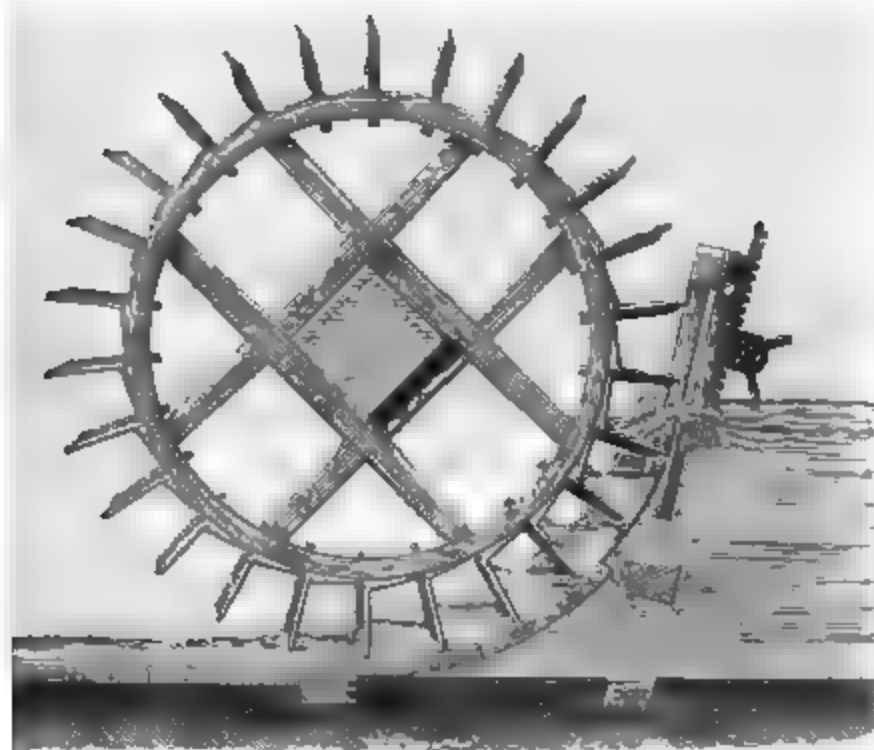


Fig. 442.

à l'inverse. L'eau vient ainsi rencontrer les aubes avec une certaine vitesse, et agit presque exclusivement par son poids pour faire tourner la roue.

Si on compare la roue de côté, disposée comme nous venons de le dire, avec la roue à augets, on verra qu'elle présente certains avantages relativement à cette dernière roue. Premièrement, l'eau comprise entre les aubes ne cesse d'agir par son poids lorsqu'elle est arrivée au bas de la roue ; tandis que, dans la roue à augets, l'eau sort toujours des augets avant d'avoir atteint le bas de la roue. Secondement, la roue n'a pas à supporter la tota-

lité du poids de l'eau qui agit sur elle ; car la pression exercée sur chaque aube par l'eau qui la surmonte n'est qu'une compensation du poids de cette eau, et le coursier supporte l'autre compensation de ce poids, il en résulte que la roue, tout en recevant de la même quantité de travail, se trouve beaucoup moins chargée, par suite, les frottements de son arbre sur ses supports sont considérables. Mais ces avantages sont contre-balancés par deux inconvénients, dus à ce que le jeu qui existe nécessairement entre les bords des aubes et le coursier occasionne une perte d'eau, aussi à ce que l'eau, en se mouvant le long du coursier, éprouve une résistance assez considérable. Pour éviter que la perte d'eau entre les aubes et le coursier ne soit trop grande, on est obligé de faire mouvoir la roue plus rapidement qu'une roue à augets, et en résulte que l'eau quitte la roue avec une vitesse notable qui entraîne une perte de travail. En résumé, la roue de coulisse posée comme l'indique la fig. 442, donne de moins bons résultats que la roue à augets ; mais elle est de beaucoup préférable à la roue en dessous : elle utilise environ les 0,65 du travail réellement développé par l'eau.

§ 379. **Roue Poncelet.** — Les roues en dessous ont, comparées aux roues à augets et sur les roues de côté, l'avantage de mouvoir l'eau avec une vitesse assez grande ; ce qui fait que, pour une même quantité d'eau à dépenser, la roue n'a pas besoin d'avoir une grande largeur, puisque l'eau reste beaucoup moins de temps à l'intérieur, et qu'en conséquence la quantité d'eau que contient la roue à chaque instant est beaucoup moindre.

On conçoit donc qu'il était d'une grande importance de chercher à modifier la roue en dessous, de manière à lui faire utiliser la plus grande fraction possible du travail moteur fourni par l'eau, et à lui ôter l'avantage qui vient d'être signalé. C'est ce qu'a fait M. Poncelet. La roue qu'il a imaginée, et qui porte son nom, fig. 443, ne diffère de la roue en dessous, dont nous avons parlé précédemment (§ 376), qu'en ce que les aubes planes y sont remplacées par des aubes courbes, qui sont à peu près tangentes à la circonférence extérieure de la roue.

Il est aisé de comprendre comment cette disposition fait que le travail transmis par l'eau à la roue est plus grand que dans la roue où les aubes seraient planes. D'abord l'eau, à son entrée dans la roue, ne produit pas de choc sur les aubes, parce que ces aubes, en raison de la forme qui leur a été donnée, ne se présentent au liquide que par leur tranche. D'un autre côté, si l'on fait en sorte que la roue prenne une vitesse convenable, l'eau sortira des

assez très petite, ainsi qu'il est aisé de le reconnaître en voyant de quelle manière elle se comporte dans la roue, depuis son entrée jusqu'à sa sortie. On voit, en effet, que l'eau,

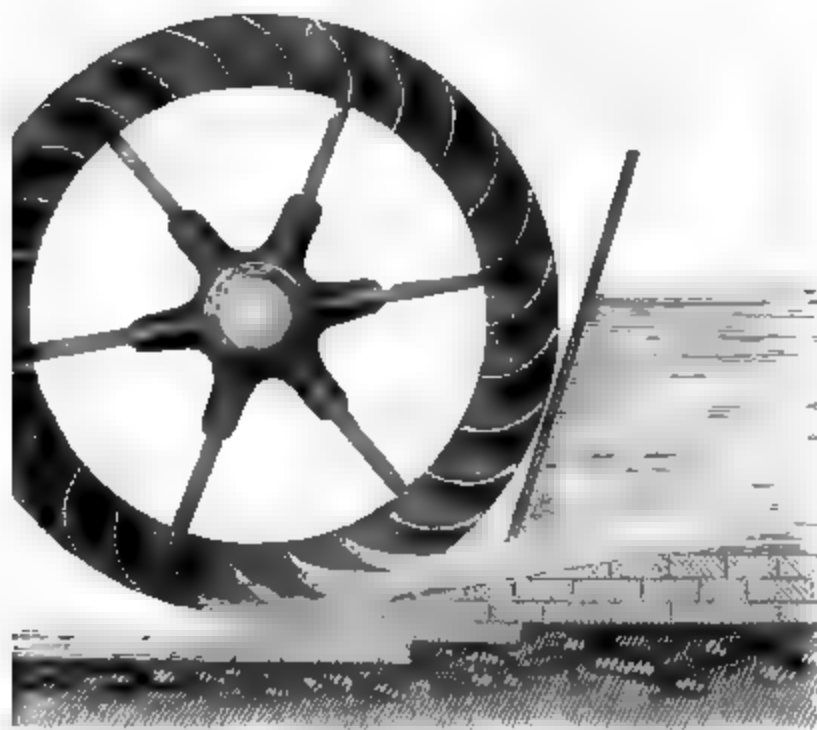


Fig. 443.

chaque aube avec une vitesse plus grande que celle qu'elle a en glissant sur sa surface et s'élever ainsi dans sa courbe jusqu'à ce que la pesanteur ait détruit son mouvement ; à partir de là elle redescend en glissant sur l'aube en arrière, et prenant ainsi une vitesse rétrograde de plus en plus grande par rapport à l'aube. S'il arrive donc que cette vitesse de l'eau, au moment où elle quitte l'aube, soit égale à celle de la roue à sa circonférence, l'eau se trouvera dans les mêmes conditions que si les dernières portions de l'aube courbées l'entraînaient sans l'entraîner ; et, par suite, son mouvement sera pour ainsi dire nul. Si l'on joint à cela que l'inclinaison de la vanne, inclinaison qui est quelquefois très grande, fait disparaître à peu près complètement la perte de vitesse due au frottement de l'eau contre les parois du cours d'eau, on voit que la roue Poncelet satisfait, autant que peut le permettre la nature des choses, aux conditions générales énoncées précédemment (§ 375).

On a fait voir que, pour que la roue produise le maxi-

moulin d'effet, il faut que sa vitesse, à la circonférence, soit la même que celle de l'eau. Dans ce cas, le rapport du travail transmis par la roue, au travail que représente la quantité d'eau dépensée, est de 0,56, ou même à 0,60, tandis que, comme nous l'avons vu, le rapport est seulement de 0,25, lorsqu'il s'agit d'une roue à aubes planes.

§ 380 **Roue plongeant dans un courant incliné.** — Pour faire connaître les diverses roues hydrauliques à axe horizontal, nous devons encore parler des roues à palettes planes, qui sont placées dans le courant d'une rivière, de manière à les faire plonger dans l'eau par leur partie inférieure. Ces roues, fig. 444, qui

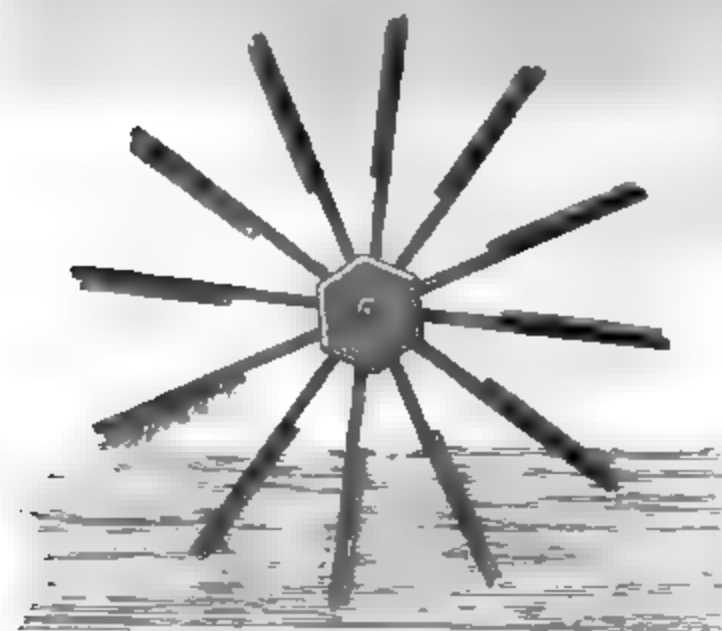


Fig. 444.

est installée ordinairement sur des poutres de bois solidement ancrées, sont mises en mouvement par la pression que l'eau exerce sur celles de ses palettes qui sont immergées. Il n'a pas ici à examiner si, en donnant telle ou telle forme à la roue, on utilisera plus ou moins complètement la fraction plus ou moins grande

du travail moteur dont on dispose. Ce travail moteur, développé par la totalité de l'eau qui coule dans la rivière, est surabondant; on n'a besoin d'en utiliser qu'une faible portion, et l'on n'est généralement pas limité dans la largeur qu'on peut donner à la roue. Aussi préfère-t-on employer une roue d'une construction très simple, quoique peu avantageuse, sauf à obtenir par un élargissement des aubes ce qu'une meilleure disposition aurait pu donner avec de moins grandes dimensions.

Une roue de ce genre ne produit pas toujours la même quantité de travail, suivant qu'elle marche plus ou moins vite, dans le même courant. L'expérience a fait reconnaître que la vitesse des palettes, prise au milieu de leur hauteur, devait être les 0,1

l'eau, pour que le travail transmis par l'eau à la roue fût grand possible.

Roue à cuillers. — Les roues à axe vertical sont depuis longtemps employées, surtout dans le midi de la France, pour mouvoir des moulins. Elles se prêtent mieux que les autres à ce genre de travail, en raison de la simplicité de la transmission du mouvement de la roue motrice à la meule courante (§ 149) ; le arbre vertical porte la roue à sa partie inférieure, et la meule à sa partie supérieure. Ces roues sont de deux espèces : les roues à cuillers, et les roues à cuve.

La roue à cuillers, fig. 145, est formée d'une sorte de moyeu

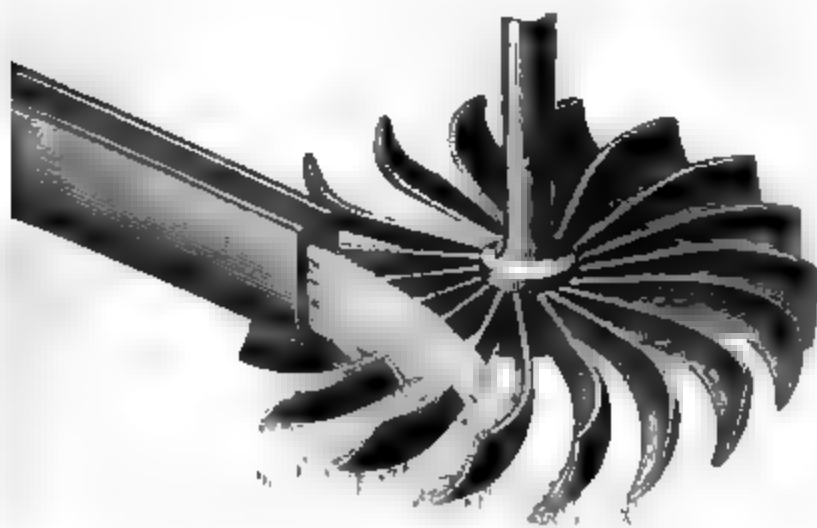


Fig. 145.

sur lequel sont implantées des pièces de bois taillées de manière à présenter à l'eau une surface concave et oblique ; ces diverses pièces sont désignées sous le nom de *cuillers*. L'eau est amenée vers la roue par un petit canal de bois, ou par une buse adaptée à la partie inférieure d'un réservoir. Chaque cuiller, en tournant, reçoit l'action de l'eau ; et les chocs successifs que reçoit la roue entretiennent son mouvement.

On a trouvé que ces roues pouvaient utiliser environ le tiers du moteur développé par la chute d'eau, et que, pour cela, les points de la roue qui sont directement choqués par l'eau ne reçoivent environ les 0,70 de celle du liquide. Ces roues conviennent bien, en raison de leur grande simplicité, pour des chutes d'eau grandes qui ne fournissent pas beaucoup d'eau.

Roue à cuve. — Les roues à cuve ont une forme analogue à celle des roues à cuillers : mais, au lieu d'être isolées et de

recevoir le choc d'une veine liquide qui vient tomber e
de leur contour, elles sont installées dans une cuve cyl

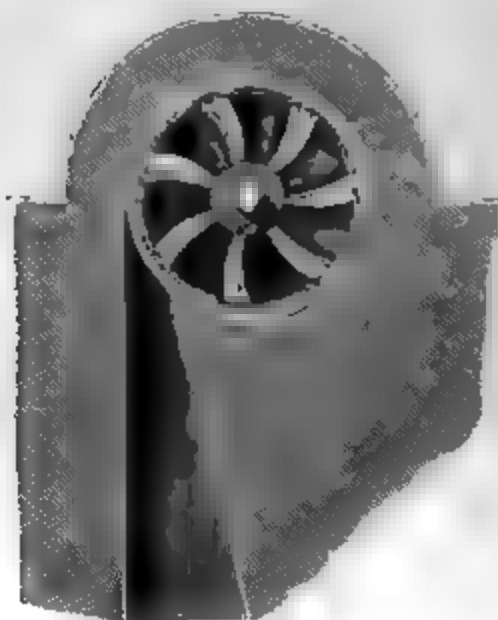


Fig. 446.

maçonnerie qui est
le bas. L'eau motri
née dans cette cuve
lement à sa circon
un canal A, fig 446
au-dessus de la fac
de la roue, elle tour
la cuve en vertu
qu'elle possède, et
dant ainsi dans la r
traîne dans son mo
ratoire. Après avoir
les surfaces courbe
comme les palettes
elle tombe au-de
bief d'aval.

Le mouvement
la cuve détermine
ments qui diminue

sa vitesse ; d'un autre côté, une portion de l'eau s'éco
duire d'effet, par l'intervalle qui existe entre le contour
et les parois de la cuve. Aussi une roue à cuve n'utilise
que les 0,16 du travail que représente la quantité d'eau
et, en la construisant avec tout le soin possible, on ne
élève au delà de 0,25 ce rapport entre le travail trans
et le travail dépensé. Les roues à cuve sont employées
ment lorsqu'on a à sa disposition une grande quantité
d'une faible hauteur

§ 383 **Roues à réaction.** — Imaginons qu'un vase
de l'eau soit disposé de manière à pouvoir tourner libre
autour d'une verticale, fig. 447, et qu'il soit muni in
de deux tubes horizontaux par lesquels l'eau puisse s'écou
posons de plus que les tubes soient recourbés à leurs extré
sens contraire l'un de l'autre. Aussitôt que l'écoulement
on verra le vase prendre un mouvement de rotation
opposé à celui dans lequel l'eau sort de chaque tube. On
dre compte de la manière dont ce mouvement se présente
observer que les molécules liquides, animées d'une certaine
à l'intérieur de chacun des deux tubes horizontaux, ont
de changer de direction lorsqu'elles arrivent aux extrémités

tubes, en raison de la forme qu'on leur a donnée : ce changement dans la direction de la vitesse de chaque molécule ne peut pas s'effectuer sans qu'elle réagisse sur le tube, en produisant une pression en sens contraire et c'est l'ensemble des pressions ainsi déterminées qui fait tourner l'appareil, et qui pourrait même lui faire produire une certaine quantité de travail. Le nombre des tubes horizontaux d'écoulement pourrait être de 3, 4, 5, etc., le mouvement de rotation se produirait toujours de la même manière, pourvu que ces tubes fussent tous recourbés dans un sens convenable à leurs extrémités.

Cet appareil est désigné sous le nom d'*appareil à réaction*. Il a servi de type à plusieurs moteurs hydrauliques, appelés *roues à réaction*, qui sont peu employés, et que nous n'examinerons pas en détail.

§ 384. *Turbine Fourneyron*. — Les roues à axe vertical ont reçu, depuis environ vingt-neuf ans, de grands perfectionnements qui les ont mises au rang des meilleurs moteurs hydrauliques qu'on puisse employer. Ces roues perfectionnées ont reçu le nom de *turbines*. Nous allons en faire connaître la disposition.

La première turbine qui ait attiré l'attention générale, par les avantages qu'elle présente, et par les bons résultats qu'elle fournit sous le rapport de la quantité de travail effectué, est celle de M. Fourneyron. Voici en quoi elle consiste. L'eau du bief d'amont A, fig. 448, pénètre librement dans un cylindre B qui descend jusqu'au-dessous du niveau du bief d'aval. Ce réservoir cylindrique est fermé à sa base ; mais il est ouvert latéralement, en C, sur tout son contour : en sorte que, si rien ne s'y opposait, l'eau qui arrive dans le cylindre B s'écoulerait par cette ouverture, en formant

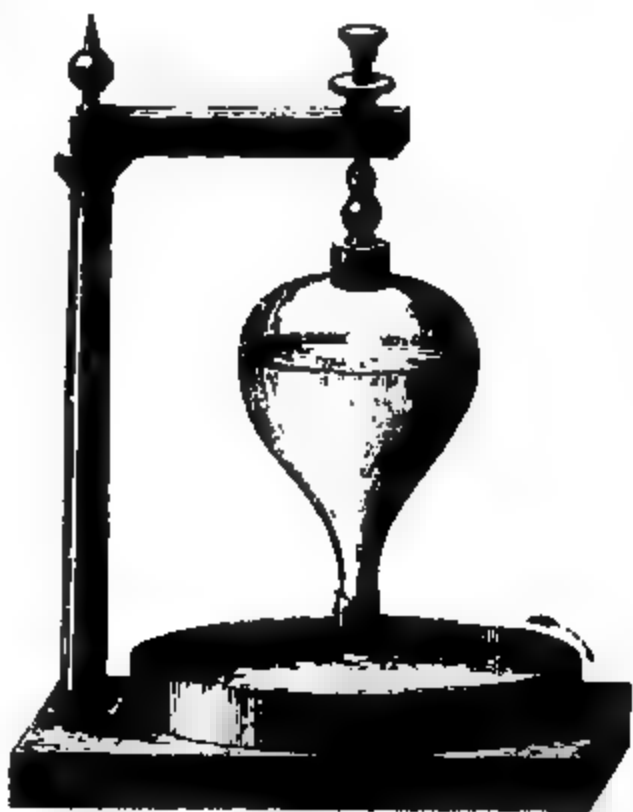


Fig. 447.

une nappe continue qui s'étalerait dans tous les sens. La roue annulaire D est disposée horizontalement, tout autour de l'ouvrage

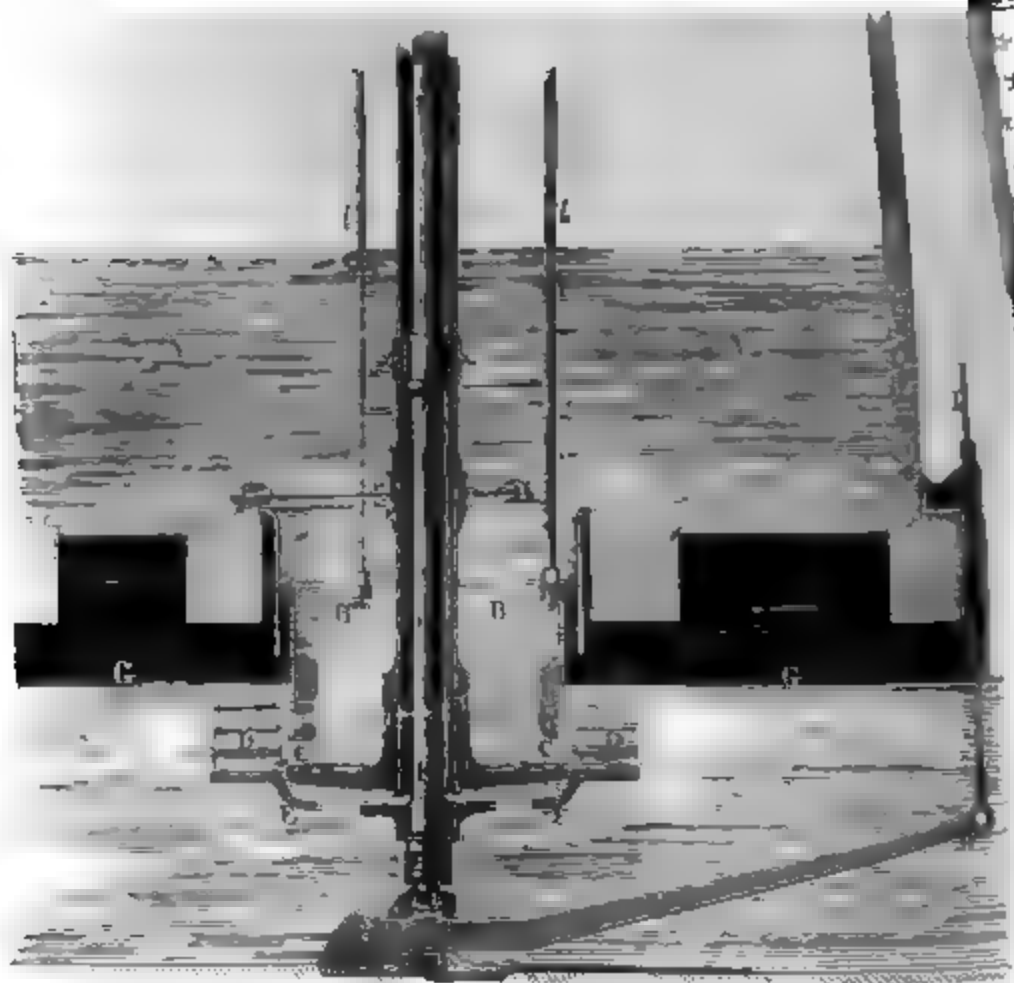


Fig. 448.

dont on vient de parler, de manière à se présenter partout sur le passage de la nappe d'eau qui s'en échappe. On se fera une idée nette de cette roue, en imaginant que ce soit la roue à aubes courbes de la fig. 443 (page 549) qu'on a placée horizontalement, après avoir enlevé les bras qui relient la couronne à l'arbre, afin que le bas du réservoir B puisse pénétrer à son intérieur. Une sorte de calotte de fonte E relie la roue à un arbre central F, qui s'élève verticalement, en passant à l'intérieur d'un tuyau disposé au milieu du réservoir B. La roue est tout entière plongée dans l'eau du bief d'aval, dont le niveau est en G. L'arbre F se termine inférieurement par un pivot, qui s'appuie sur un levier HK, mobile autour du point K. Une tige L, articulée à l'extrémité H du levier, se

à sa partie supérieure par une vis dans laquelle s'engage 1; c'est en faisant tourner cet écrou, qui est d'ailleurs soutenu par des pièces fixes, qu'on peut élever ou abaisser l'arbre F, avec la roue qu'il porte, de manière à amener à être exactement en regard de l'ouverture C par laquelle t du réservoir B.

l'immersion de la roue dans l'eau du bief inférieur n'empêche du réservoir B de sortir par l'ouverture C, pour venir agir sur les aubes dont cette roue est munie sur tout son contour. L'effet se produit en vertu de la différence de niveau dans les biefs. Si l'eau n'était pas dirigée dans son mouvement à l'entrée du réservoir B, les molécules liquides sortiraient par les divers points de l'ouverture C, en se mouvant perpendiculairement à la surface latérale de ce réservoir. En pénétrant de cette manière à l'intérieur de la roue, elles agiraient bien sur les aubes, et leur communiqueraient un mouvement de rotation : il est difficile de disposer ces aubes de manière à satisfaire aux conditions générales que doit remplir un bon moteur hydraulique (375). C'est pour cela que M. Fourneyron a disposé à l'entrée du réservoir B des cloisons

dont on voit la forme sur la fig. 449, qui est une coupe horizontale dans la machine à la hauteur de la roue. La courbure de ces cloisons est dirigée en sens contraire de la courbure des aubes de la roue D. Il résulte de là que l'eau sort du réservoir B en se mouvant partout obliquement à sa surface; elle vient ainsi frapper les aubes, qui s'opposent à la continuation de son mouvement, et sur elles, de tous côtés, des forces qui font tourner la roue dans le sens indiqué par la flèche.

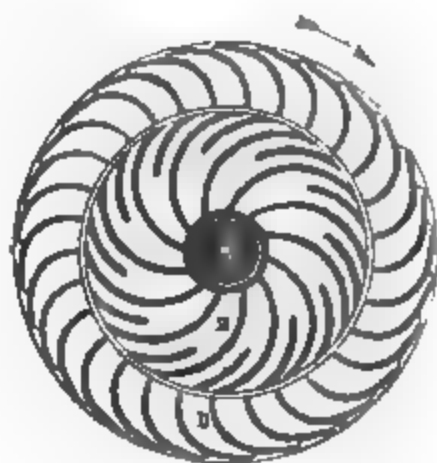


Fig. 449.

Une vanne cylindrique aa, fig. 448, existe à l'intérieur du réservoir sur tout son contour: cette vanne est destinée à rétrécir ou à dilater l'ouverture C par laquelle l'eau sort de ce réservoir et se rend dans la roue. A cet effet, elle peut être abaissée ou élevée à volonté au moyen de trois tringles verticales b, b, b, à leur partie supérieure de filets de vis, dans lesquels sont des écrous qu'il suffit de faire tourner ensemble dans le sens convenable. Les bords inférieurs de cette vanne aa présen-



suite du mouvement de la roue, les aubes fuient liquides : elles ne peuvent recevoir d'action de leur de la vitesse relative que ces filets liquides possèdent elles (§ 327). Or, les aubes sont disposées de manière que la turbine aura la vitesse qu'elle doit prendre la vitesse relative de l'eau par rapport à la roue soit la tangente à chaque aube menée par son extrémité résulte de là que l'eau entre dans la roue sans pression. En se mouvant le long des aubes courbes, de l'intérieur, elle exerce une pression en chaque point, en sa vitesse change constamment de direction. En roue avec une vitesse relative dirigée en sens contraire des aubes ; et l'on conçoit que l'on puisse faire tourner la turbine un mouvement tel que la vitesse de rotation extérieure soit précisément égale à cette vitesse. Cette condition est remplie, l'eau, à sa sortie de la roue, se déplace comme d'un mouvement insensible, et viendra ainsi au milieu de laquelle la roue est plongée ; elle est donc, déposée sans vitesse par les aubes, qui la entraînent.

On voit que la turbine Fourneyron satisfait aux conditions du roue Poncelet (§ 379) aux conditions générales de

Ajoutons à cela que, l'eau agissant en même temps sur toutes les aubes de la turbine, les pressions horizontales qu'elle exerce sur les aubes ne tendent à entraîner l'axe de la roue ni d'un côté ni de l'autre; et en conséquence ces pressions ne déterminent aucun déplacement de l'arbre sur son pivot, ni sur les corps qu'il touche en divers points de sa hauteur, et qui sont destinés à le maintenir dans une position exactement verticale. Ces circonstances, qui n'auraient pas pu être réalisées dans une roue à axe horizontal, font que la turbine dont il s'agit donne de meilleurs résultats que la roue à aubes. L'expérience a fait voir que cette turbine utilise les 0,75 du travail moteur que représente la quantité d'eau dépensée, et que dans certains cas, elle en utilise les 0,80.

La turbine Fourneyron présente encore d'autres avantages d'une grande importance, que nous allons indiquer. D'abord elle peut fonctionner au milieu de l'eau du bief d'aval, comme le montre la fig. 448. Il résulte de cette disposition, qui est généralement adoptée par M. Fourneyron, mais qui n'est pas indispensable : 1° que la machine fonctionne toujours, à l'époque des crues, comme au moment des basses eaux, sans qu'on ait à s'inquiéter de la hauteur plus ou moins grande du niveau de l'eau dans le bief d'aval; 2° que la totalité de la hauteur de chute est utilisée, ce qui n'aurait pas lieu si la roue devait être placée au-dessus du niveau de l'eau dans le bief d'aval; 3° enfin que la machine marche même au moment des fortes gelées, puisque l'eau ne passe à l'état de glace qu'à la surface des cours d'eau.

Un autre avantage de la turbine dont nous nous occupons, avantage qui a été constaté par des expériences nombreuses, consiste en ce qu'on peut faire varier sa vitesse dans des limites assez étendues, de part et d'autre de la vitesse qui correspond au maximum d'effet, sans que le rapport du travail utilisé au travail moteur que représente la quantité d'eau employée diminue beaucoup. Ce résultat a une très grande importance, pour les cas où une turbine doit marcher toujours avec la même vitesse, et où la hauteur de la chute d'eau motrice varie. En effet, la vitesse d'une turbine qui correspond au maximum d'effet dépend de la hauteur de la chute; elle augmente ou diminue en même temps que cette hauteur. Si la turbine marche toujours avec la même vitesse, sous des hauteurs de chute différentes, elle n'a pas constamment la vitesse capable de produire le maximum d'effet: il est donc très important que la machine, fonctionnant avec une vitesse différente de cette vitesse particulière, fournisse des résultats qui approchent beaucoup du maximum d'effet qu'on pourrait en obtenir.

Enfin la turbine Fourneyron peut être adaptée à toute espèce de chute, pourvu qu'on la dispose en conséquence, suivant la quantité d'eau plus ou moins grande qui doit agir sur elle, et la rapidité de mouvement qu'elle doit prendre. Pour qu'il ne reste pas de doute à ce sujet, il suffit de citer deux exemples. M. Fourneyron a établi à Saint-Blaise, dans la forêt Noire, une turbine qui est mise en mouvement par une chute de 108 mètres de hauteur; cette turbine dont le diamètre n'est que de 0^m,55, fait 2300 tours par minute, et a une force de 40 chevaux-vapeur: elle utilise les 0,75 de la hauteur de la chute. D'un autre côté, dans des expériences faites sur une turbine établie à Gisors, on a trouvé que, sous une chute de 1^m,13, la machine utilisait les 0,75 du travail développé par la chute; que sous une chute de 0,63, elle en utilisait les 0,66, et enfin que sous une chute de 0^m,34, elle en utilisait encore les 0,60. Aucune des roues hydrauliques connues n'aurait pu produire d'aussi bons résultats, dans ces circonstances exceptionnelles.

§ 385. **Turbine Callon.** — Au milieu de tous les avantages que nous venons de signaler dans la turbine Fourneyron, il existe un inconvénient qui fait qu'elle n'utilise pas toujours une aussi grande portion du travail développé par la chute. Nous avons dit que l'ouverture par laquelle l'eau sort du réservoir, pour se rendre dans la roue, peut être rétrécie plus ou moins, dans le sens de la hauteur, au moyen d'une vanne cylindrique, qui règne tout autour du réservoir, et que l'on peut élever ou abaisser à volonté. On donne à cette vanne une position ou une autre, suivant qu'on a une quantité d'eau plus ou moins grande à dépenser. La nappe d'eau qui s'échappe du réservoir, sur tout son contour, pour pénétrer dans la roue, a donc une épaisseur plus ou moins grande, suivant les cas, et, en conséquence, elle ne remplit pas toujours la roue dans toute sa hauteur. La partie supérieure de l'espace compris entre les aubes de la roue ne reste cependant pas vide, mais l'eau qui s'y trouve ne possède pas la vitesse de celle qui sort du réservoir: et cela occasionne des remous, accompagnés de pertes de vitesse, qui déterminent une diminution dans l'effet utile. C'est pour cela que M. Fourneyron divise sa roue en plusieurs compartiments dans le sens de sa hauteur, au moyen de cloisons horizontales que l'on voit sur la *fig. 448*. Mais ces cloisons ne font pas disparaître complètement l'inconvénient qui vient d'être signalé.

M. Ch. Callon a imaginé un autre moyen de faire varier la quantité d'eau dépensée par la turbine. Ce moyen consiste à remplacer la vanne unique de M. Fourneyron par un grand nombre de vannes partielles, correspondant aux différentes portions de l'ouverture par

L'eau passe du réservoir dans la roue. A l'aide de cette motion, on conçoit que l'on puisse diminuer la quantité d'eau qui va au réservoir, sans diminuer l'épaisseur de la lame d'eau ; il suffit en effet, de fermer complètement quelques-unes des vannes mobiles, prises régulièrement dans tout le contour du réservoir, et laisser les autres entièrement ouvertes. L'inconvénient qui se rencontrait dans la turbine Fourneyron ne se rencontre plus dans celle de M. Callon ; mais il est remplacé par un autre, qui consiste en ce que les diverses portions de la roue passent successivement devant des vannes ouvertes et devant des vannes fermées. Au moment où l'intervalle de deux aubes arrive en regard d'une vanne fermée, l'eau qui y est contenue, et qui est animée d'une vitesse très grande, ne peut continuer à se mouvoir qu'en produisant un choc derrière elle, ce qui occasionne une diminution brusque dans la vitesse, et par suite entraîne une perte de travail.

186. Turbine Fontaine.—M. Fontaine de Chartres a donné à sa turbine une disposition différente de celle qu'avait adoptée M. Fourneyron. Au lieu de faire descendre l'eau motrice dans un cylindre qui va jusqu'au milieu de la roue, pour la faire sortir sur tout son tour, et la faire marcher dans la roue, de l'intérieur à l'extérieur, on a imaginé de faire sortir l'eau du réservoir A, *fig.* 450, par une ouverture annulaire BB pratiquée dans son fond, et de la faire aller du haut en bas dans la roue CC, qui se trouve placée au-dessous de cette ouverture annulaire. La roue est reliée par une sorte de jante de fonte EE, avec un arbre vertical FF auquel elle communique son mouvement de rotation. Cet arbre est creux, et enveloppe un arbre GG qui est solidement appuyé au fond du bief inférieur. Ce dernier arbre ne tourne pas avec la roue ; mais il supporte sur sa tête, qui forme crapaudine, un pivot fixé à l'arbre FF de la roue. Par cette disposition, la turbine est pour ainsi dire suspendue ; et le pivot se trouvant hors de l'eau, on peut l'enlever facilement dans un état convenable pour éviter les frottements et l'usure.

L'ouverture BB, par laquelle l'eau sort du réservoir, pour entrer dans la roue, est divisée, dans tout son contour, en un grand nombre d'orifices distincts, par des cloisons courbes destinées à diriger l'eau dans son mouvement. Chacun de ces orifices est muni d'une vanne spéciale à l'aide de laquelle on peut le fermer plus ou moins. Une couronne aa réunit les extrémités supérieures des tiges de ces diverses vannes ; cette couronne est d'ailleurs soutenue par des tringles c, c, à l'aide desquelles on peut la faire monter ou descendre, ce qui fait varier en même temps la grandeur

des ouvertures par lesquelles l'eau peut s'écouler. La figure 450 montre la disposition des vannes d, d , qui sont arrondies pour éviter les pertes de vitesse dues aux changements brusques de direction des filets liquides, e, e , sont les cloisons courbes qui dirigent l'eau à sa sortie, f, f , sont les aubes de la turbine, également courbes, mais dirigées en sens contraire des directrices e, e .

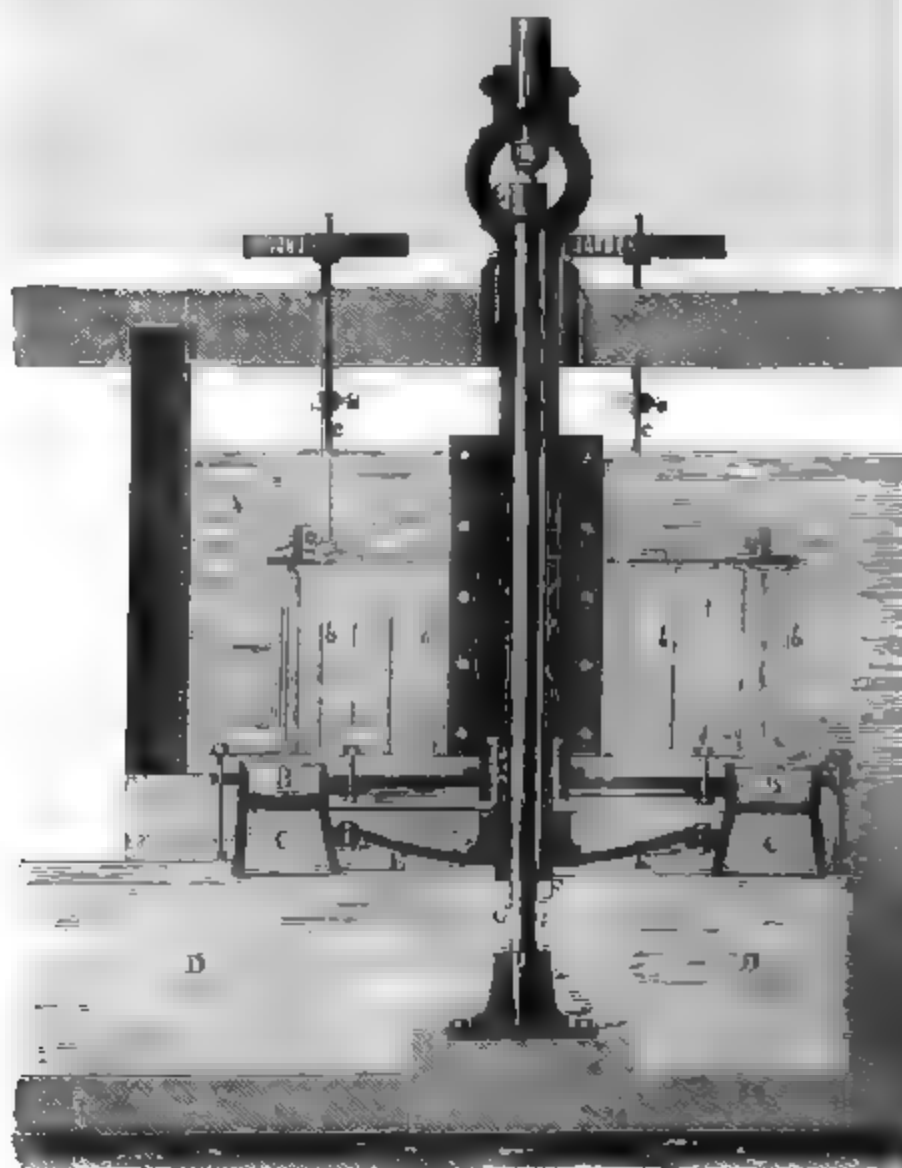


Fig. 450.

La disposition que M. Fontaine a donnée à ses vannes paraitre en grande partie l'inconvénient que nous avons vu à la turbine Fourneyron, et qui fait que le rendement de

on ne lui fournit pas toute l'eau qu'elle est capable de produire. Les deux espèces de turbines donnent d'ailleurs d'aussi bon rendement que l'autre, lorsqu'elles sont suffisamment ou-

turbine Kœchlin.— Les turbines Kœchlin que nous venons de parler de sous une manière incomparable, car on ne peut atteindre la même puissance, par un moyen autre que celui parvenu à abaisser le niveau de l'eau dans le bief d'amont, soit que la roue soit immergée dans ce bief, soit qu'elle se trouve au-dessus de lui à une petite distance. On établit ordinairement une digue momentanée, qui isole le bief où se trouve la turbine du reste du cours d'eau ; on y amène l'eau au moyen de pompes, et on y est conte-

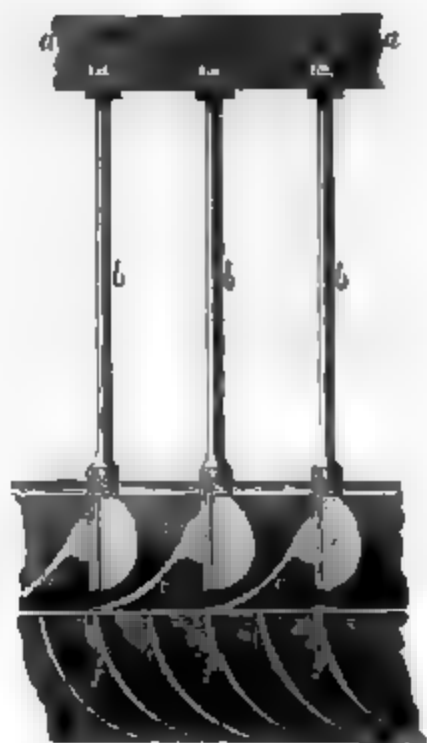


Fig. 461.

la turbine Kœchlin, qui a été imaginée par M. Jonval, et qui a été perfectionnée par MM. A. Kœchlin de Mulhouse, dans une disposition particulière, qui a pour objet de faire disparaître les difficultés de visites et de réparations que nous venons de voir dans les autres turbines. Voici quel en est le principe. L'eau soit amenée du bief d'amont dans le bief d'aval par un conduit vertical qui débouche dans l'un et dans l'autre de ces biefs. On pourra utiliser le travail développé par le passage de l'eau dans le cylindre, en installant à sa partie inférieure une turbine à aubes, comme nous avons décrites. Mais, au lieu de la placer au bas de cette chute, on peut aussi l'installer en haut, à la hauteur du cylindre, pourvu que l'eau, en descendant, et parcourant ensuite la portion de ce cylindre qui est au-dessus de la roue, ne soit mise en communication avec l'atmosphère qu'après qu'elle est arrivée dans le bief d'aval. En effet, que si l'on perd de la force en plaçant la turbine en haut, en raison de ce que la hauteur du niveau du bief d'amont au-dessus de la roue est plus petite, d'un autre côté, on en

gagne par l'aspiration qui se produit dans la partie du cylindre au-dessous de la roue, aspiration qui est d'autant plus grande que la roue est à une plus grande distance du niveau de l'eau d'aval. On comprend maintenant que la position que l'on a ainsi à la machine permettra de la visiter et de la réparer plus facilement, car il suffira de ne plus laisser arriver l'eau dans le cylindre qui contient la turbine, pour que ce cylindre se vide complètement, et que la roue soit ainsi mise à sec.

La turbine Kœchlin, dans laquelle l'eau agit de bas en haut, comme dans la turbine Fontaine, et non horizontalement comme dans les autres machines de ce genre, fournit d'ailleurs d'excellents résultats, lorsqu'elle fonctionne dans les circonstances pour lesquelles elle a été établie.

§ 388 **Turbines hydropneumatiques.** — Nous avons vu les avantages que présentent les turbines de pouvoir marcher avec l'eau, avantages dont le plus important est d'utiliser la hauteur de chute, quels que soient les changements de niveau d'aval. Mais nous avons vu qu'il en résulte un inconvénient notable, dans le cas où la turbine ne dépense pas l'eau pour laquelle elle a été construite. Si l'eau sort du réservoir par tous les orifices, que l'on rétrécit plus ou moins, la quantité d'eau à dépenser, comme dans les turbines de Fontaine, elle ne remplit pas tout l'espace compris entre les aubes de la roue : le reste de cet espace est occupé par l'air d'aval, qui ne fait que tourner avec la roue, et sa présence occasionne des remous accompagnés de pertes d'un certain nombre des orifices de sortie du réservoir. Dans la turbine Caillon, l'intervalles des aubes de la roue n'est bien complètement rempli lorsqu'il passe devant un orifice, mais lorsque cet intervalle, en tournant, vient à passer devant un orifice fermé, l'eau y éprouve un ralentissement brusque, et le vide que son mouvement tend à produire derrière elle ne se présenterait pas si la turbine marchait avec l'eau, et si elle était disposée de manière que l'intervalles des aubes ne fût jamais complètement rempli par l'eau qui s'écoule successivement : le reste de cet espace serait occupé par l'air, qui communiquerait librement avec l'air extérieur. La présence de l'air ne gênerait en rien la marche de l'eau dans les aubes courbes.

Pour réunir à la fois les avantages de la marche avec l'eau et ceux de la marche dans l'air, M. L.-D. Girard a eu

les turbines dans l'air comprimé. Concevons qu'une turbine soit installée au-dessous du niveau d'aval, et qu'elle soit entièrement recouverte d'une espèce de cloche qui plonge dans l'eau dont les bords se trouvent un peu plus bas que la partie supérieure de la roue. Si l'on foule de l'air dans cette cloche, le niveau de l'eau s'y abaissera de plus en plus ; mais à partir du moment où ce niveau se sera abaissé jusqu'aux bords de la cloche, les quantités d'air introduites ne le feront pas baisser davantage, l'excédant s'échappera par le bas de la cloche, et remontera dans l'atmosphère en traversant l'eau du bief d'aval. A l'aide de cette disposition, la roue ne sera pas noyée ; elle se trouvera à une certaine distance au-dessus du niveau de l'eau environnante, et sera toujours placée de même par rapport à ce niveau, quelle que soit la hauteur de l'eau dans le bief d'aval. Tel est le principe des turbines hydropneumatiques.

On prend facilement compte de la manière dont l'eau agit dans une turbine, en se reportant à ce qui a été dit sur l'écoulement d'un liquide par un orifice, lorsque la pression est plus grande à l'orifice que sur la surface libre du liquide dans le réservoir (p. 39). Si le niveau du bief d'aval est situé à 3 décimètres au-dessus des bords de la cloche qui contient la turbine, l'excès de pression de l'air renfermé dans cette cloche sur l'air extérieur sera équilibré par une colonne d'eau de 3 décimètres de hauteur. L'écoulement de l'eau du réservoir dans la turbine, et par conséquent dans l'air comprimé de la cloche, s'effectuera de la même manière que si cet air n'était pas comprimé, et que le niveau du bief d'amont fût plus bas de 3 décimètres. Ainsi l'écoulement du liquide sera toujours dû à la hauteur de chute, c'est-à-dire à la différence de niveau des biefs d'amont et d'aval. L'emploi de l'air comprimé amène donc le même résultat que si, en laissant la turbine où elle est installée, on abaissait à la fois les biefs d'amont et d'aval d'une même quantité, de manière à placer le bief d'aval le plus bas possible, et le bief d'amont à être immédiatement au-dessous de la roue. On voit donc que la turbine hydropneumatique réunit l'avantage de l'emploi de l'air comprimé à celui d'utiliser autant que possible la totalité de la hauteur de chute.

Dans la construction des turbines hydropneumatiques, on n'a pas à adopter des dimensions telles que l'intervalle des aubes de la roue soit complètement plein de liquide, lorsque la turbine dépense une grande quantité d'eau qu'on puisse lui donner. Il vaut même mieux que une partie de cet intervalle soit toujours occupée par de l'air communiquant librement avec l'air environnant, et que l'eau ne

l'asse que s'étaler en nappe dans la concavité de chaque aube. C'est ce qui fait que, lorsqu'on n'a qu'une petite quantité d'eau à disposition, on peut donner à la roue des dimensions plus grandes que celles qu'on lui aurait données sans cela, et que, par conséquent, on peut la faire tourner moins rapidement, ce qui est un avantage. L'emploi des vannes partielles de M. Ch. Callon, appliquées aux turbines Fourneyron, soit aux turbines Fontaine, est alors applicable à la disposition qui consiste à rétrécir plus ou moins les orifices par lesquels l'eau passe du réservoir dans la roue en ne laissant aucun complètement. L'expérience a prouvé que les turbines de cette manière utilisent sensiblement la même fraction de la force de la chute (0,73, quelle que soit la quantité d'eau disponible, ce qui est un résultat des plus importants.

Il ne reste plus qu'à indiquer de quelle manière on maintient l'atmosphère d'air comprimé dans la cloche qui recouvre la roue et y parvient au moyen d'une pompe foulante à air, que la turbine elle-même fait mouvoir pendant tout le temps qu'elle marche. Les nouvelles quantités d'air introduites ainsi constamment dans la cloche compensent les pertes qui proviennent, soit des fuites qui peuvent exister, soit de ce que l'eau entraîne de l'air avec elle, mais la pompe en fournit toujours un excès qui s'échappe en passant sur les bords de la cloche, de sorte qu'on est sûr que le niveau de l'eau près de la turbine correspond toujours à ces bords.

M. Girard a proposé d'appliquer le même système aux roues hydrauliques à axe horizontal, afin de les empêcher d'être noyées au moment des crues.

§ 389. Considérations générales sur l'établissement d'une roue hydraulique. — Lorsqu'on veut établir une roue hydraulique, pour utiliser la force d'une chute d'eau, il faut d'abord choisir, parmi les diverses espèces de roues, celle qui convient le mieux aux circonstances dans lesquelles on est placé. Des raisons de diverses natures peuvent entrer en considération pour le choix qu'on a à faire. La simplicité plus ou moins grande de la roue et des constructions que nécessitera son établissement; la facilité des réparations qu'on a besoin de faire de temps en temps à des machines de ce genre, la nature de la chute, et les variations que sa force éprouve aux diverses époques de l'année; le besoin plus ou moins grand qu'on a d'utiliser le mieux possible la force de cette chute, sont autant de motifs qui conduiront à faire adopter tel ou tel système de moteur.

Lorsqu'on aura fait son choix, on saura quelle fraction de la force de la chute sera utilisée par la roue qu'on aura adoptée. Ce

exemple, les 0,75 de cette force, s'il s'agit d'une roue à d'une turbine; ou les 0,56, si c'est une roue en dessous surbes; ou bien encore les 0,25, si c'est une roue en dessous planes.

On devra donc, d'après la connaissance qu'on a de la force de calculer le nombre de chevaux-vapeur qui représentera la roue, et régler d'après cela le nombre et les dimensions des machines spéciales destinées à la production du travail utile, mais ce seront, ou des pompes destinées à élever de l'eau à une certaine hauteur, ou des moulins à farine, ou des métiers à filer, etc. On aura besoin d'emprunter à l'expérience la connaissance de la valeur de chacun de ces travaux qui peut être effectué par un cheval-vapeur.

On devra aussi connaître la hauteur de la chute, et la nature de la roue qu'on adopte. On devra régler le nombre de tours que cette roue doit faire dans un temps donné pour produire le maximum d'effet. On devra, en conséquence, établir entre l'arbre de la roue et les mécanismes qu'elle doit mouvoir une liaison telle que ces mécanismes marchent avec la plus convenable au travail qu'ils effectuent, lorsque la roue prendra ce mouvement particulier qui lui permet d'utiliser la plus grande fraction possible du travail développé par la chute. On pourra, pour cela, soit d'engrenages (§ 59), soit de courroies (§ 58).

Après la connaissance de la vitesse que doit prendre la roue, on pourra déterminer la quantité d'eau que lui fournira la chute dans un temps déterminé, et par conséquent les dimensions des aubes ou augets sur lesquels l'eau doit agir.

La roue sera construite et installée, et qu'elle aura été mise en communication avec les machines spéciales qu'elle doit faire fonctionner. Il ne s'agira plus que d'ouvrir les vannes qui permettent à l'eau de sortir du bief supérieur, pour qu'elle vienne exercer son action sur la roue, et la mettre en mouvement. Si l'on donne à la roue une quantité d'eau de plus en plus grande, il est clair qu'elle prendra un mouvement de plus en plus rapide. On conçoit donc qu'il est possible de cette manière lui donner la vitesse qui convient pour produire le maximum d'effet; et, si les données d'expériences sur lesquelles on s'est fondé pour son établissement sont bien exactes, on pourra ainsi précisément la quantité d'eau que la chute est capable de fournir sans interruption.

Machine à colonne d'eau à simple effet. — Les roues à colonne d'eau sont les machines dont on se sert dans la plupart des usines pour utiliser la force d'une chute d'eau; cependant il y a des

circonstances exceptionnelles dans lesquelles on a recours à d'autres moyens. Lorsqu'on a à sa disposition une chute d'une grande hauteur, qui ne fournit qu'une petite quantité d'eau, on peut profiter de cette chute pour donner un mouvement de va-et-vient à un piston qui se meut dans un corps de pompe; ce mouvement de va-et-vient, en se transmettant ensuite à divers mécanismes, déterminera la production d'une certaine quantité de travail utile.

Les machines motrices, dans lesquelles la force de l'eau est appliquée à un piston, qui, en raison de cette action, se meut tantôt dans un sens, tantôt dans l'autre, sont désignées sous le nom de *machines à colonne d'eau*. La machine est à *simple effet*, lorsque l'eau ne fait mouvoir le piston que dans un sens, et que son mouvement en sens contraire est déterminé par son propre poids ou par le poids des diverses pièces qui lui sont fixées. Elle est à *double effet*, lorsque l'eau agit constamment sur le piston soit pour le pousser dans un sens, soit pour le faire mouvoir en sens contraire.

Nous prendrons pour exemple de machine à colonne d'eau à simple effet, les belles machines que M. Juncker a établies dans la mine de Huelgoat, en Bretagne. La fig. 452 en est une coupe qui montre tous les détails de leur disposition. Un piston A est installé dans un cylindre BB qu'il peut parcourir dans toute sa longueur. Ce cylindre est ouvert par le haut et fermé par le bas; son fond est traversé par la tige du piston A. L'eau qui doit faire mouvoir la machine, et qui doit agir sur le piston A par la pression due à la hauteur de la chute, est amenée par un tuyau C, qui part du réservoir supérieur, et vient aboutir à la machine même. Une ouverture D, pratiquée au bas du cylindre BB, permet à l'eau motrice de pénétrer dans ce cylindre, de presser le piston A de bas en haut, et de le faire monter à l'intérieur du cylindre; cette même ouverture laisse écouler l'eau contenue dans le cylindre BB, et par suite permet au piston A de descendre, lorsqu'on supprime sa communication avec le tuyau C, et qu'on la fait communiquer librement avec l'atmosphère.

Pour que le piston A puisse prendre un mouvement de va-et-vient dans le cylindre BB, il faut donc que l'ouverture D soit alternativement mise en communication avec le tuyau des eaux motrices C et avec l'atmosphère, c'est à cela qu'est destiné l'appareil régulateur que l'on voit à gauche du cylindre BB. Cet appareil se compose essentiellement de deux pistons E, F, montés sur une même tige, et pouvant se mouvoir ensemble dans le cylindre qui les contient. Ces deux pistons occupent, sur la fig. 452, la position la plus basse qu'ils

ussent prendre, la *fig* 452, qui reproduit l'appareil régulateur, les montre au contraire dans leur position la plus élevée. Dans une ou dans l'autre de ces deux positions, l'eau motrice, qui vient par le tuyau C, communique toujours avec l'espace compris entre les deux pistons E, F. Mais dans la première, *fig* 452, le piston E est au-dessous de l'ouverture D, et par conséquent l'eau motrice peut venir presser le piston A et le faire monter; tandis que dans la seconde, *fig* 453, le piston E intercepte le passage de l'eau motrice et permet, au contraire, à l'eau qui s'est introduite sous le piston A, en le soulevant, de s'écouler par le tuyau de décharge G, et de laisser redescendre le piston. Resto donc à faire voir comment les deux pistons E, F, reçoivent un mouvement de va-et-vient, en vertu duquel l'ouverture D est alternativement en communication avec le tuyau C et avec le tuyau G.

Le piston F est un peu plus large que le piston E. L'eau motrice, qui arrive toujours librement entre eux, exerce donc une plus grande pression sur la face inférieure du premier que sur la face supérieure du second; et, en conséquence, les deux pistons tendent constamment à monter, en vertu de la différence de ces deux pressions. C'est ce qui arrive en effet, tant qu'une autre action ne vient pas se combiner avec celles que nous venons de signaler, et c'est ainsi que les pistons E, F, passent de la position indiquée par la *fig* 452 à celle de la *fig* 453. Pour produire le mouvement contraire, on a adapté au cylindre dans lequel se meuvent les pistons E, F, un petit tuyau H, qui se relève, et communique avec le dessus du piston F, par la petite ouverture I. L'eau motrice, en passant par ces conduits, vient exercer sa pression sur la tête du piston F; et, pour que la pression ainsi produite ne soit pas trop grande, on a surmonté le piston F d'un manchon cylindrique qui traverse le fond supérieur du cylindre, en sorte que l'eau amenée par l'ouverture I ne presse ce piston que sur la surface annulaire qui entoure ce manchon. Un mécanisme particulier, dont nous allons parler, met l'ouverture I alternativement en communication avec le tuyau H qui amène l'eau motrice, et avec le tuyau MM qui aboutit au tuyau de décharge G. Dans le premier cas, la pression que l'eau motrice exerce sur la face supérieure du piston F, tout autour du manchon qui le surmonte, l'emporte sur la résultante des pressions que cette même eau exerce sur la face inférieure du piston F et sur la face supérieure du piston E: et ces deux pistons descendent. Dans le second cas, l'eau qui se trouve au-dessus du piston F communiquant avec le tuyau de décharge G, la différence des pressions de l'eau motrice sur la face inférieure du piston F et sur

la face supérieure du piston E fait remonter ces deux pistons.
Deux petits pistons K, L, se trouvent dans un petit cylindre

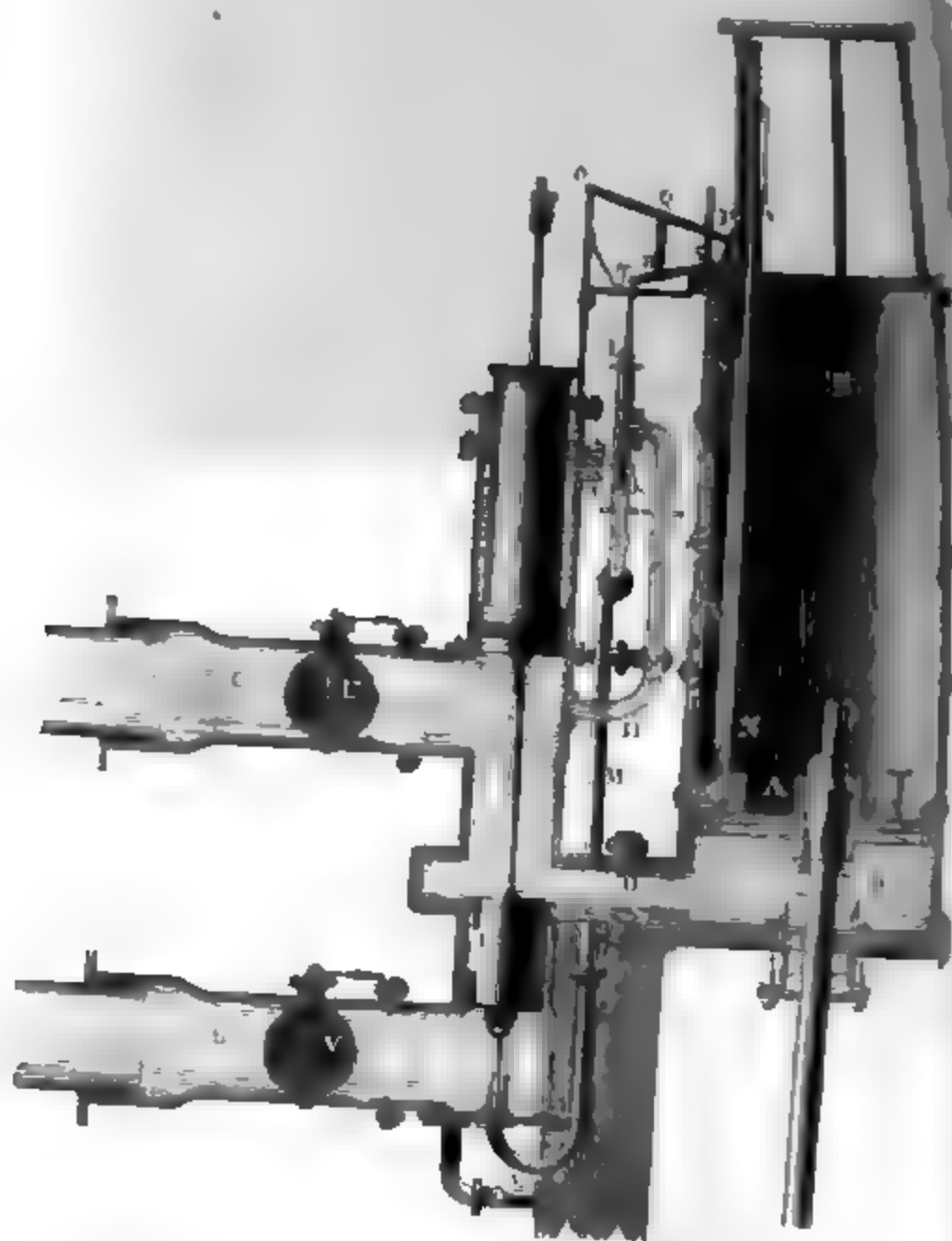


Fig. 452. (Échelle de 22 millimètres pour mètre.)

entre le tuyau H et l'ouverture I. Un mouvement de va-et-vient de ces deux pistons amène le piston K, tantôt au-dessous de l'ouver-

2, tantôt au-dessus de cette ouverture, *fig. 453* ; et communiquer le dessus du piston F, soit avec l'eau tuyau H, soit avec le tuyau de décharge, par le mouvement de va-et-vient des petits pistons K, L, et le piston A lui-même. A cet effet il est surmonté, qui agit, à la fin de chaque course ascendante ou

sur un levier OP, muni point O. Une tringle en Q à ce levier, transmettent à un second levier autour du point S, articulée en R. La tige des K, L, est articulée au bout de ce levier ST. Le piston A, qui monte et descend, est d'ailleurs surmonté de deux petits taquets X, Y, sur sa face antérieure, l'antérieure ; ces taquets tournent à son tour, rencontrent les cames de l'arc P, et font mouvoir les deux leviers, et les pistons K, L. La machine dans l'occupation les diverses positions que le piston A monte de l'eau motrice : les pistons sont au bas de leur course, en arrivant par l'ouverture I, presse l'eau motrice du piston F, et les deux pistons E, F, au bas de leur course : le donc soumis à l'action d'eau qui arrive libre-

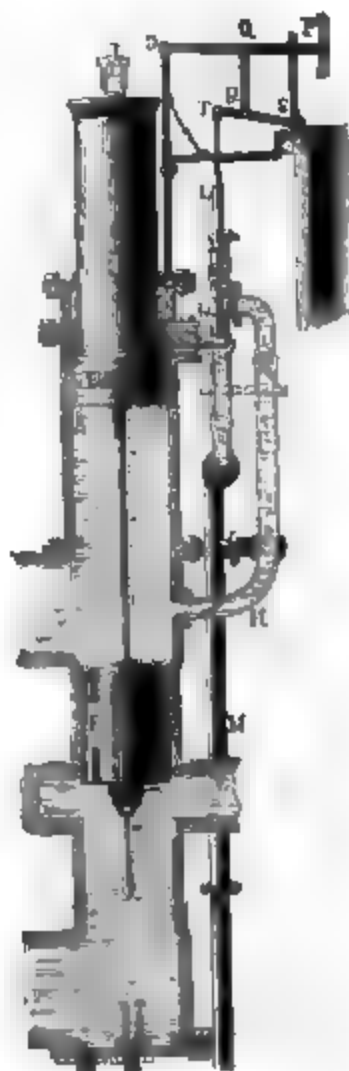


Fig. 453.

D, et il s'élève tant que les pistons E, F, ne chancelent. Lorsque le piston L arrive vers le haut de sa course, le taquet X saisit la came que porte l'extrémité supérieure de l'arc, en faisant tourner le levier OP autour de son point d'appui ; le levier ST tourne en même temps autour du point



comme au moment où l'eau A, en se retirant, que OP dans la position qu'il occupait d'abord, *Fig. 44*. L, sont ainsi ramenés en même temps au bas. L'eau motrice, pouvant passer de H en I, vient du piston F, et détermine l'abaissement des de le tuyau C est donc de nouveau mis en commu bas du cylindre BB, le piston A remonte, et a voit donc que, dès le moment que la machine a mouvoir, elle se suffit à elle-même, et continue marcher, sans qu'on ait besoin de s'en occuper.

Pour modérer la marche de la machine, on papes à gorge U, V, dans les tuyaux C, G. soupapes d'une quantité plus ou moins grande étranglements qui ralentissent la marche du piston lorsqu'il monte, soit lorsqu'il descend, et l'on p sorte qu'il prenne telle vitesse que l'on veut. Les donne aux taquets X, Y, sur la tige NN, réglent due de la course du piston. Pour arrêter la machine fermer deux robinets qui sont installés, l'un l'autre sur le tuyau M; cette simple opération fait E, F, ne peuvent plus ni monter ni descendre l'endroit où ils se trouvent au moment où l'on robinets. On peut même reconnaître sans peine

ce commence par communiquer avec cette ouverture
nelures supérieures ; le passage qui est ainsi offert à
agrandit de plus en plus, en raison de ce que la pro-
s cannelures va en augmentant depuis leur origine jus-
se du piston : en sorte que la communication de l'eau
vec l'ouverture D s'établit ainsi progressivement jusqu'à
ette ouverture soit complètement démasquée. Il en est de
ur la communication de l'ouverture D avec le tuyau de
e, lorsque le piston E remonte.

que le piston E passe devant l'ouverture D, il éprouve une
ession latérale de la part de l'eau qui y est contenue. Pour
tte pression ne l'applique pas fortement contre la paroi du
e dans lequel il se meut, ce qui donnerait lieu à un frotte-
onsidérable, on a évidé ce cylindre, dans tout son contour,
ard de l'ouverture D. De cette manière, l'eau contenue en D
and librement tout autour du piston E ; elle exerce égale-
sa pression sur tout son contour, et il en résulte qu'il n'est
yé ni d'un côté ni de l'autre sur la paroi du cylindre dans
il est engagé : il se meut sans éprouver plus de frottement
ette paroi que s'il n'était pas soumis à la pression dont nous
ns.

ux machines, entièrement pareilles à celle que nous venons
crire, sont installées l'une à côté de l'autre, dans la mine de
o argentifère de Huelgoat. Elles sont mises en mouvement
ne chute d'eau de 60 mètres de hauteur. Le piston moteur A
acune d'elles est lié à une longue tige qui traverse le fond
ylindre BB, et descend verticalement dans un puits, pour y
mouvoir une pompe d'épuisement. Cette pompe élève d'un
jet l'eau du puits à une hauteur verticale de 230 mètres.

lorsque le piston A monte dans le cylindre BB, que l'eau de
ne est refoulée par la pompe dans le tuyau d'ascension, à cette
ur prodigieuse. Pendant que ce piston moteur redescend, avec
igue tige qui le relie au piston de la pompe d'épuisement,
aucune résistance utile à vaincre ; aussi a-t-on employé un
n particulier pour équilibrer en grande partie le poids de tout
ppareil, afin d'éviter la trop grande rapidité de sa descente,
inconvenients graves qu'elle aurait pu entraîner. Au lieu de
r le cylindre BB au niveau de la galerie souterraine par
lle devaient s'écouler les eaux provenant de la pompe d'épui-
nt et du tuyau de décharge G, on l'a installé à 44 mètres en
e-bas de cette galerie. La hauteur de la colonne d'eau motrice
ive donc portée ainsi à 74 mètres ; et l'eau, après avo

soulève le piston moteur A, ne peut être expulsée par le cylindre BB, pendant qu'il descend, qu'autant qu'il l'a lui-même élevée à une hauteur de 14 mètres, par le tuyau de décharge. L'élévation de l'eau qui a agi dans la machine est une réaction : le piston doit vaincre en descendant, et qui a été de cette manière à modérer convenablement son mouvement. Elle ne peut pas être assimilée à une résistance entièrement nulle, celle déterminée par une soupape à gorge, qui retarde au moins le passage de l'eau, et diminue ainsi sa vitesse. L'emploi a donné lieu à une augmentation correspondant à la puissance de la colonne d'eau motrice.

Les belles machines de Huelgoat, qui fonctionnent avec douceur et une régularité parfaites, utilisent près des deux tiers du travail moteur développé par la chute.

§ 391. **Machine à colonne d'eau à double effet.** — La disposition de la machine à colonne d'eau à double effet est en quelque sorte d'analogie avec celle de la machine à simple effet. La seule différence essentielle qu'en ce que le piston A, qui se meut dans un cylindre BB fermé à ses deux extrémités, agit sur l'appareil régulateur, au lieu de ne faire communiquer directement le tuyau de l'eau motrice et le tuyau de décharge. Le bas du cylindre, établit ces communications alternées : une fois avec la partie supérieure et avec la partie inférieure par les ouvertures C, D. C'est par le tuyau vertical E qu'arrive l'eau motrice : ce tuyau s'embranchant avec deux tuyaux F, G, le premier amène l'eau à l'ouverture C, et le second à l'ouverture D. Deux pistons H, K, fixés à une même tige, peuvent se déplacer dans un petit cylindre placé à côté du cylindre principal. Dans la position actuelle de ces deux pistons, l'eau motrice agit sur la partie inférieure du cylindre BB, en passant par le tuyau F et l'ouverture D : elle exerce donc sur la face inférieure du piston A une pression qui est dirigée de bas en haut. En même temps, l'eau qui se trouve au-dessus du piston A communique librement avec l'ouverture C, avec le tuyau de décharge L. Le piston A est donc pressé sur sa face inférieure que sur sa face supérieure par son mouvement ascendant : l'eau qui le surmonte sort par le tuyau L et tombe dans une caisse M, qui communique avec le canal à son écoulement. Concevons maintenant qu'au moment où le piston A atteint l'extrémité supérieure du cylindre BB, les deux pistons H, K, s'abaissent, de manière à se placer respectivement sous des ouvertures C, D ; l'ouverture C communique avec le tuyau de l'eau motrice, par le tuyau F, et l'ouverture D avec le tuyau

MACHINE A COLONNE D'EAU A DOUBLE EFFET. 573

piston A redescendra donc, en faisant sortir par ce tuyau de
ge toute l'eau qui s'était introduite sous lui. Si les pistons

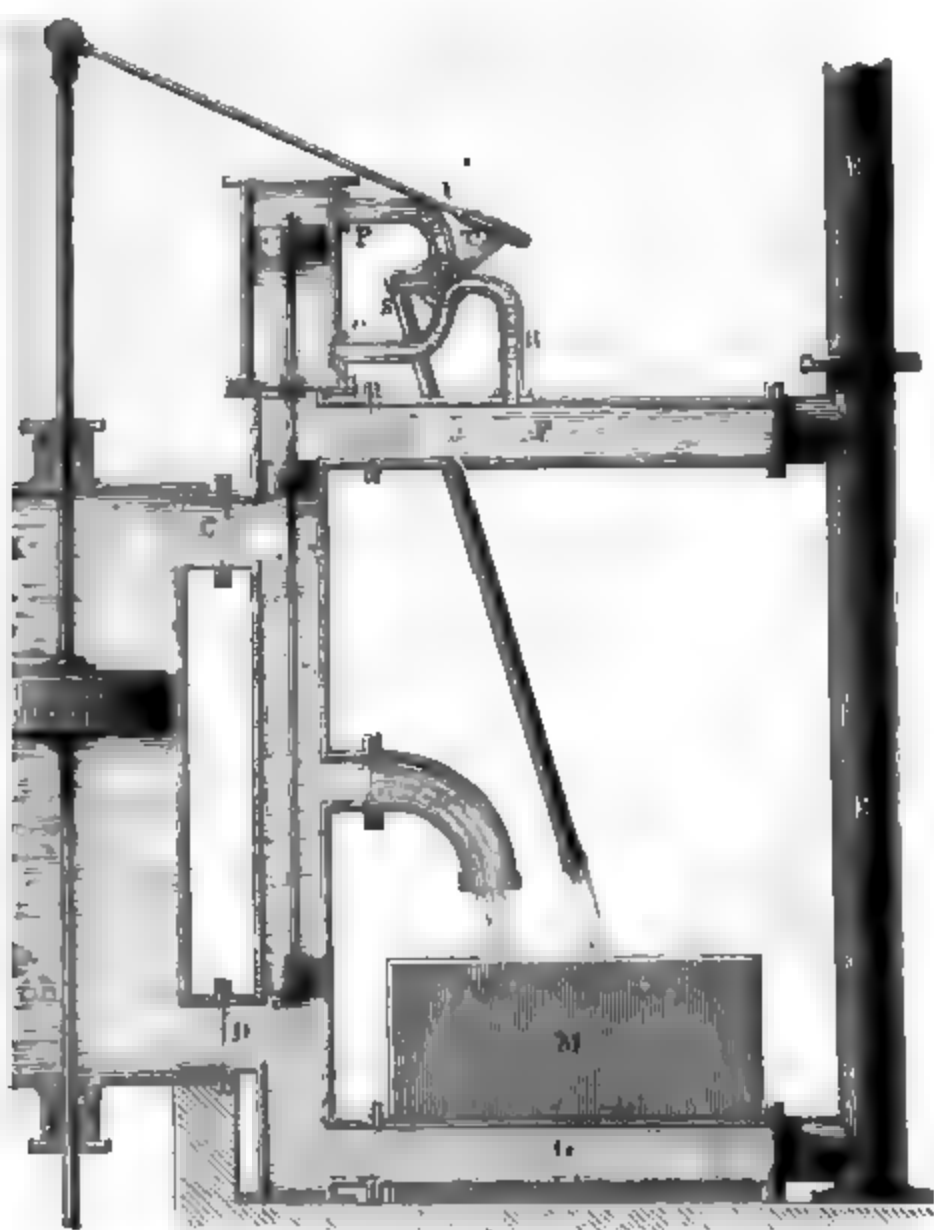


Fig. 454.

, reprennent leur première position, lorsque le piston A sera
au bas de sa course, l'eau motrice, agissant par l'ouverture
fera remonter ; et ainsi de suite
voit donc que, pour établir alternativement les communica-
tes ouvertures C, D, avec le tuyau de l'eau motrice E, et avec

le tuyau de décharge L, il suffit de faire descendre les pistons H, K, lorsque le piston A est au haut de sa course, et de les remonter, lorsqu'il est arrivé au bas. Ce mouvement alternatif des pistons H, K, est produit au moyen d'un mécanisme qui est adapté à l'extrémité de la tige de ces deux pistons. Ce mécanisme peut se mouvoir dans un cylindre spécial placé au-dessous d'eux, où se trouvent les pistons H, K. Un robinet O, qui peut être placé dans des positions différentes, suivant que le piston A arrive au haut ou au bas de sa course, fait communiquer alternativement la partie inférieure et la partie supérieure de ce petit cylindre, soit avec l'eau motrice, soit avec l'atmosphère, par l'intermédiaire des tuyaux P, Q. Dans la position indiquée par la figure, l'eau motrice arrive toujours librement dans le tuyau F, passe par les tuyaux R, Q, et presse le piston N de bas en haut : tandis que la partie supérieure de ce piston communique librement avec l'atmosphère, par le tuyau S, qui vient déboucher au-dessus de M. Si le robinet O tourne d'un angle droit, il prend la position indiquée par la fig. 455, et les communications sont



Fig. 455.

l'eau motrice agit sur la face supérieure du piston N, en passant par les tuyaux R, Q, qui est au-dessous de ce piston comme la partie inférieure communique avec l'atmosphère, par les tuyaux Q, S : de sorte que le piston N descend, en entraînant avec lui les deux pistons H, K. Le robinet O, par l'une de ses extrémités, d'une manière que le bouton s'engage dans l'œil allongé d'une bielle U, articulée à un prolongement de la tige du piston A. Tant que le bouton de la bielle T se trouve entre les extrémités de l'œil, le piston A se meut, sans que l'eau prenne le moindre mouvement ; la bielle agit sur la manivelle T que lorsque le piston A est près d'arriver à l'une ou l'autre des extrémités de sa course. Il est aisé de concevoir, d'après cela, que la machine se suffit à elle-même, et qu'elle peut marcher ainsi indéfiniment, sans qu'on ait besoin de lui fournir autre chose que l'eau qui arrive par le tuyau E de l'eau capable de vaincre la pression des résistances appliquées au piston A.

§ 392. **Belier hydraulique.** — Nous avons dit (§ 37) qu'une chute agissait quelquefois d'elle-même, sans avoir besoin pour produire du travail utile : nous allons en voir un exemple remarquable dans le belier hydraulique. Cette machine inventée par Montgolfier, en 1796, a pour objet de

une chute d'eau, pour élever une portion de l'eau fournie par elle à un niveau supérieur à celui du bief d'amont.

Supposons que l'eau de la chute dont on dispose ne puisse s'écouler par un tuyau d'une certaine longueur, qui débouche au-dessus de la hauteur de chute. Lorsque ce tuyau sera ouvert à son extrémité inférieure, l'eau s'écoulera en prenant une vitesse qui sera à la fois de la hauteur de chute et des frottements occasionnés par son mouvement dans le tuyau. L'écoulement étant continu, si l'on vient tout à coup à fermer l'orifice de sortie du tuyau, l'eau contenue à son intérieur sera obligée de s'arrêter brusquement; mais cela ne se fera pas sans que cette masse d'eau exerce une pression énorme sur les parois qui la renferment. Constatons maintenant qu'un tuyau d'ascension s'embranché sur le tuyau d'écoulement dont nous venons de parler, et que l'extrémité supérieure de ce tuyau d'ascension soit fermée par une soupape qui s'ouvre de bas en haut. Au moment où la colonne d'eau en mouvement sera brusquement arrêtée, elle ouvrira la soupape, et s'élançant dans le tuyau d'ascension, où elle montera jusqu'à une certaine hauteur. Si l'on recommence à produire le mouvement d'écoulement dans le tuyau d'écoulement, et à l'arrêter tout à coup en fermant l'orifice, le liquide ouvrira de nouveau la soupape du tuyau d'ascension, pour passer en partie dans ce tuyau, où le niveau s'élèvera en conséquence. En répétant successivement la même opération, on pourra déterminer ainsi l'élévation de l'eau dans le tuyau d'ascension, à une hauteur beaucoup plus grande que la hauteur de chute; et, si ce tuyau aboutit à un réservoir supérieur, on pourra remplir le réservoir, en opérant comme nous venons de le faire pendant un temps suffisamment long. Tel est le principe du bélier hydraulique. Voyons maintenant quelle est la disposition que présente Montgolfier, et d'après laquelle il fonctionne seul, sans avoir besoin de s'en occuper.

Fig. 456 est une coupe d'un bélier hydraulique qui existe au château de la Celle-Saint-Cloud, près Paris, et qui y a été établi par Montgolfier lui-même, pour l'élévation de l'eau nécessaire aux jardins du château. L'eau d'une pièce d'eau, située à un niveau inférieur, et alimentée par des sources, est amenée par le tuyau A. Ce tuyau présente une ouverture tournée vers le haut, par laquelle l'eau s'écoule. Une soupape B est suspendue par sa tige à une poutre qui surmonte cette ouverture, et se trouve ainsi sur le sommet du liquide, qui passe tout autour d'elle pour sortir. A partir du moment où l'écoulement commence, la vitesse de l'eau va augmentant; il en résulte que la soupape B éprouve de bas

en haut, de la part du liquide, une pression de plus en plus grande ; bientôt cette pression suffit pour la soulever, et elle vient s'appuyer contre les bords de l'orifice, qu'elle ferme complètement. Alors la masse d'eau contenue dans le tuyau A, se trouvant animée d'une vitesse un peu grande, et ne pouvant plus sortir par cet orifice,

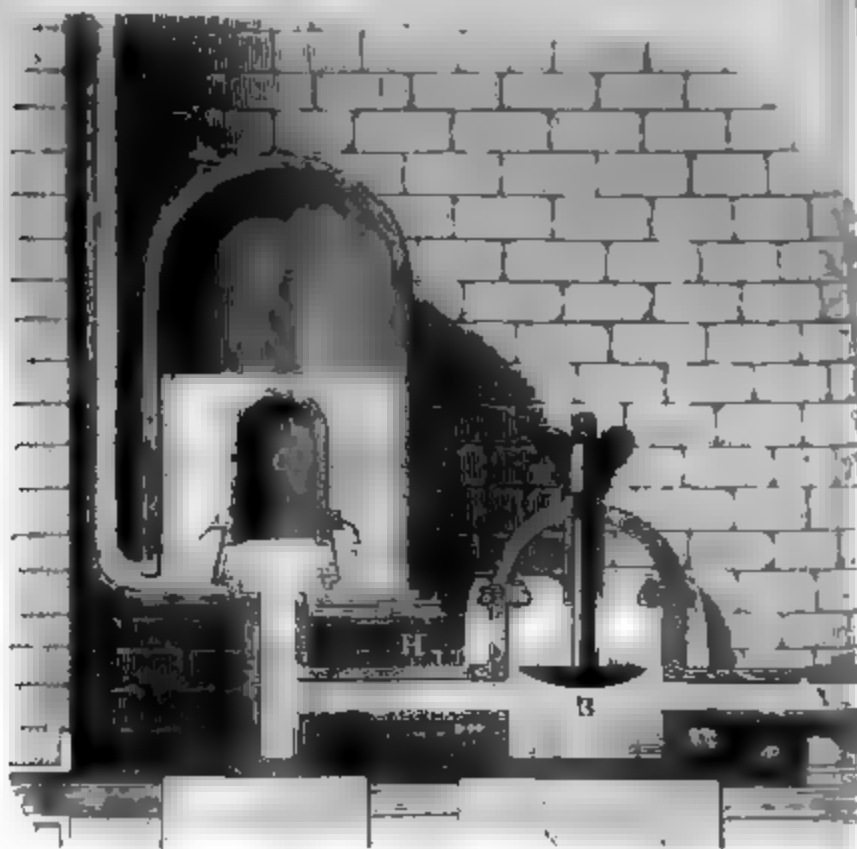


Fig. 456. (Échelle de 12 centimètres pour mètre.)

exerce une pression considérable sur toutes les parties des soupapes qui la contiennent ; cette pression ouvre les soupapes E, et une certaine quantité d'eau, traversant ces soupapes, se rend dans un réservoir qui les enveloppe, et d'où elle passe dans un tuyau d'ascension G. Au bout d'un temps très court, toute la vitesse de l'eau contenue dans le tuyau A est anéantie ; les soupapes E se ferment ; la soupape B, qui n'éprouve plus une aussi grande pression sur sa face inférieure, retombe dans sa position primitive, et le jeu de la machine recommence comme précédemment. L'eau qui sort du tuyau A, pendant tout le temps que la soupape

ouverte, tombe sur le sol environnant, et s'écoule au dehors par le tuyau D.

Le tuyau A se relève à son extrémité de gauche, pour aboutir à la capacité C au bas de laquelle sont les soupapes E, E. Cette capacité contient de l'air à sa partie supérieure. La pression de cet air joue un grand rôle dans la marche de la machine. Lorsque l'écoulement de l'eau est brusquement arrêté par la fermeture de la soupape B, si le liquide ne se trouvait en contact qu'avec des parois solides, il se produirait un choc assez violent; et c'est en vertu de ce choc que les soupapes E, E s'ouvriraient, pour livrer passage à une certaine quantité d'eau. L'air contenu en C fait disparaître ce choc presque complètement, ce qui empêche l'appareil de se détériorer aussi promptement, et donne lieu en même temps à la production d'une plus grande quantité de travail utile. Au moment où l'eau ne peut plus s'écouler au dehors, elle comprime l'air, et perd ainsi peu à peu sa vitesse; en même temps la pression exercée par l'eau de tous côtés va en augmentant. Lorsque la vitesse de l'eau est complètement anéantie, l'air réagit pour reprendre son volume primitif; il repousse l'eau, qui rétrograde dans le tuyau A, et la pression diminue. Pendant ce temps les soupapes E, E restent ouvertes, tant que la pression qu'elles éprouvent de dedans en dehors surpasse celle qui est constamment exercée sur leurs faces extérieures, et elles livrent ainsi passage à une portion du liquide. Le mouvement rétrograde que prend l'eau dans le tuyau A, et qui est produit par la réaction de l'air contenu en C, ne cesse pas au moment où la pression s'est réduite à celle qui est due à la hauteur de la chute; l'eau continue à se mouvoir, en vertu de sa vitesse acquise; la pression continue donc aussi à décroître, et devient même inférieure à la pression atmosphérique. Cette espèce d'aspiration intérieure fait tomber la soupape B, et l'eau recommence à sortir comme précédemment par l'ouverture qui la surmonte.

Le réservoir F, qui enveloppe les soupapes E, E, et duquel part le tuyau d'ascension G, contient également de l'air à sa partie supérieure. Cette seconde masse d'air a pour objet d'entretenir un mouvement continu dans le tuyau d'ascension, et agit exactement de la même manière que celle dont nous avons parlé précédemment, à l'occasion de la pompe à incendie (§ 359). Au moment où les soupapes E, E s'ouvrent, l'eau pénètre dans le réservoir, en comprimant l'air qui y est contenu, et n'est pas obligée de s'élancer immédiatement dans le tuyau d'ascension, comme cela arriverait sans cette disposition. Il est clair que la pression nécessaire pour

578 MACHINES QUI SERVENT A FAIRE MOUVOIR LES GAZ.

ouvrir les soupapes E, E, serait beaucoup plus grande, dans le cas où toute la colonne d'eau contenue dans le tuyau G devrait passer brusquement de l'état de repos à l'état de mouvement, au moment de leur ouverture, et qu'en conséquence ces soupapes resteraient ouvertes moins longtemps à chaque coup du bélier. La suppression de l'air contenu en F entraînerait donc une diminution considérable dans le volume de l'eau élevée.

L'eau dissout toujours une certaine quantité de l'air avec lequel elle est en contact. C'est cet air dissous dans l'eau qui s'en dégage lorsqu'on la chauffe dans un vase ouvert, et qui s'attache aux parois du vase sous forme de petites bulles. La quantité d'air que l'eau absorbe ainsi est d'ailleurs d'autant plus grande qu'il est soumis à une plus forte pression. Il résulte de là que l'air contenu dans le réservoir F doit se dissoudre peu à peu dans l'eau qui y arrive constamment, et cela en raison de la pression qu'il éprouve, d'après la hauteur à laquelle l'eau est élevée dans le tuyau G. Cette masse d'air doit donc diminuer progressivement, et même disparaître complètement, si l'on n'emploie pas un moyen particulier pour la renouveler. C'est pour cela qu'on a pratiqué une ouverture horizontale H, au-dessous d'une des deux soupapes E. Cette ouverture est fermée par une soupape qui s'ouvre de dehors en dedans. Au moment où, par le mouvement rétrograde de l'eau dans le tuyau A, il se produit une sorte d'aspiration à l'intérieur de ce tuyau, une petite quantité d'air atmosphérique entre par le conduit H, en ouvrant la soupape qui le fermait, et vient se mêler à l'air déjà contenu en C. L'arrivée de cette petite quantité d'air, à chaque coup de bélier, fait qu'une portion correspondante de l'air du réservoir C traverse les soupapes E, lorsqu'elles sont ouvertes, et monte dans la partie supérieure du réservoir F, pour y remplacer celui que l'eau enlève constamment à l'état de dissolution.

Lorsque le bélier hydraulique est bien établi, il peut utiliser jusqu'aux 0,60 du travail moteur dépensé.

MACHINES QUI SERVENT A FAIRE MOUVOIR LES GAZ

§ 393. On a besoin, dans un assez grand nombre de circonstances, d'employer des machines pour faire mouvoir des gaz. Tantôt il s'agit de retirer d'une capacité fermée une portion plus ou moins grande du gaz qu'elle contient, tantôt, au contraire, il s'agit d'accumuler une grande quantité de gaz dans une pareille capacité; tantôt on a besoin de lancer de l'air en lui donnant une grande vitesse, et

alimenter la combustion dans un fourneau, soit pour entraîner matières réduites à l'état de poussières ; tantôt on veut produire l'air d'une mine, en faisant circuler l'air dans ses galeries. Nous allons faire connaître la disposition des diverses machines qui sont employées pour atteindre ces divers buts.

quel que soit l'objet que la machine doit remplir, on doit toujours faire en sorte que le gaz qu'elle met en mouvement n'ait à l'intérieur qu'une faible vitesse, pour éviter les frottements considérables qui en résulteraient. Il faut aussi avoir soin de ne pas faire mouvoir le gaz le long de surfaces anguleuses, et autant que possible, de ne pas lui faire traverser des ouvertures trop étroites.

Si la machine est destinée seulement à déplacer une certaine masse de gaz, on doit la disposer de manière que le gaz, en la quittant, ait une vitesse aussi petite que possible ; car la vitesse qu'il possède à sa sortie de la machine, ne peut lui avoir été communiquée qu'aux dépens du travail moteur dépensé. Si la machine doit lancer le gaz avec une vitesse un peu grande, il faut tâcher que cette vitesse ne lui soit donnée qu'au point où le jet gazeux doit produire son effet, afin qu'il n'ait pas à se mouvoir rapidement dans des tuyaux plus ou moins longs.

394. Machine pneumatique. — La *machine pneumatique*, que nous nous sommes déjà servie pour diverses expériences, a pour objet de faire le vide dans un espace fermé, c'est-à-dire d'enlever l'air qui y est contenu. Cette machine, *fig. 457*, se compose, proprement parler, de deux pompes aspirantes (§ 354) accolées l'une à l'autre. Les tiges des deux pistons sont dentées en forme de sautoirs ; elles engrènent avec une roue dentée, qui est installée au milieu d'elles, et dont l'axe est muni d'un levier à poignées, servant comme une double manivelle. En saisissant les deux poignées, et en donnant au levier un mouvement de rotation alternatif autour de son axe, on fait monter ou descendre successivement l'un des deux pistons. Mais, pour nous rendre compte de la manière dont la machine fonctionne pour faire le vide, nous admettons d'abord qu'il n'y a qu'un seul piston, et par suite un seul corps de pompe.

Quand le piston B, *fig. 458*, monte dans le corps de pompe A, la soupape *a* est ouverte, et la soupape *d*, adaptée à une ouverture latérale du piston, est au contraire fermée. Le bas du corps de pompe communique alors librement, par le tuyau CC, avec l'intérieur d'une cloche ou récipient D, dont les bords s'appliquent exactement sur la platine EE, en supposant toutefois que le robinet F est convenablement tourné ; tandis que toute communication de

380 MACHINES QUI SERVENT A FAIRE MOUVROIR LES GA

cette capacité au dehors est interceptée. L'air contenu dans le récipient D, dans le conduit CC, et au bas du corps de pompe h, se dilate à mesure que le piston s'élève, pour occuper la totalité de l'espace qui lui est offert; une portion de l'air du récipient et du conduit CC passe donc dans le corps de pompe. Lorsque le piston vient ensuite à s'abaisser, la soupape a se ferme, et l'air qui

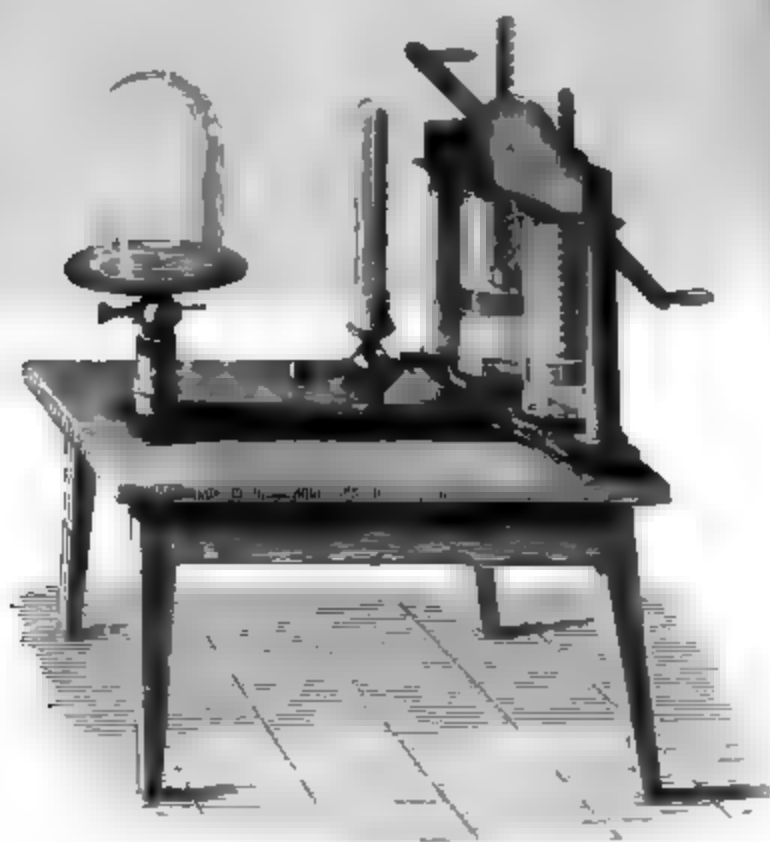


Fig. 467.

trouve dans le corps de pompe, au-dessous du piston, est comprimé de plus en plus; sa force élastique augmentant, il arrive un moment où elle est un peu supérieure à celle de l'air atmosphérique: la soupape d s'ouvre, sous la pression de l'air qui tend à soulever; cet air traverse le piston, pour se rendre dans la partie supérieure du corps de pompe, qui communique toujours librement avec l'atmosphère par quelques ouvertures pratiquées à cet effet. Le piston étant arrivé au bas de sa course, reprend un mouvement ascendant: la soupape d se ferme, la soupape a s'ouvre, et les choses recommencent comme précédemment.

La soupape *a* est fixée à une tige *b*, qui traverse le piston *B* à l'extrémité inférieure. En raison de cette disposition, le piston tend continuellement à élever la soupape *a*, tant qu'il monte, et à l'abaisser, quand il descend ; mais un talon *c*, fixé à la tige *b*, vers sa partie supérieure, empêche la soupape de s'élever d'une trop grande hauteur, et il en résulte que la soupape ne peut se mouvoir que très peu, soit de bas en haut, soit de haut en bas. Aussitôt que le piston commence sa course ascendante ou descendante, il ouvre la soupape *a*, puis elle reste immobile, et le piston continue à se mouvoir, la tige *b* glisse à son intérieur. Il était impossible d'adopter cette disposition pour la soupape *a*, car la différence des élastiques du gaz situé sous le piston et dans le récipient

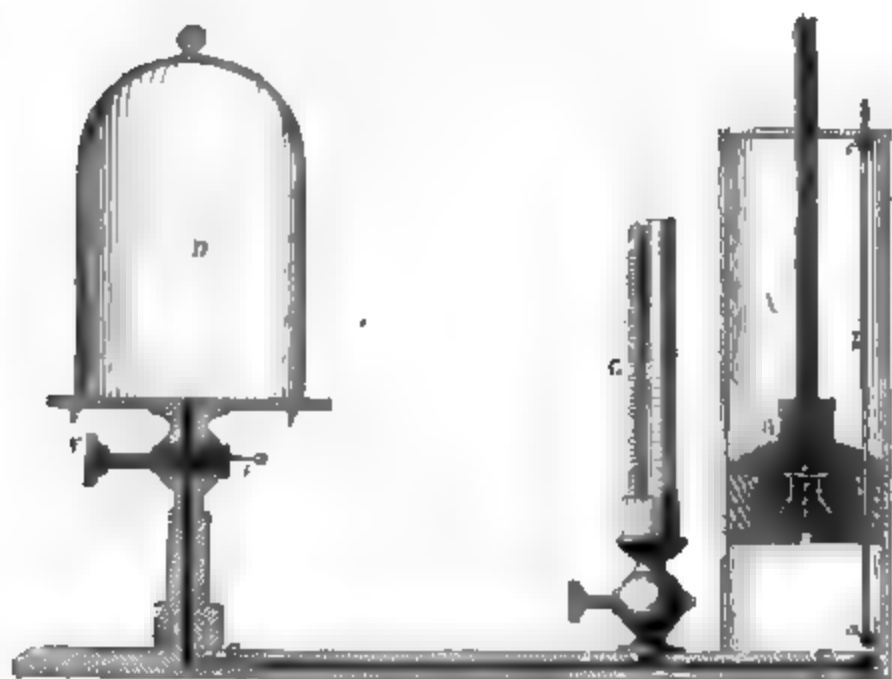


Fig. 468.

est habituellement très faible vers la fin de l'opération, et l'on n'a pas pu compter sur elle pour ouvrir ou fermer la soupape d'une manière convenable.

Le robinet *F* est percé d'une ouverture *e*, qui, pendant l'opération, doit être tournée de manière à se raccorder avec le conduit qui aboutit au centre de la platine *EE*. Lorsqu'on a vidé suffisamment, sous le récipient *D*, on ferme le robinet pour empêcher toute communication du récipient avec le con-

et le corps de pompe. Une clavette *f*, que l'on enlève à volonté, permet de faire rentrer l'air extérieur dans le récipient, par un petit conduit qui aboutit à l'extrémité du robinet *F*, et qui est habituellement fermé par cette clavette.

Un large tube de verre *G*, fermé par le haut, est ordinairement en communication avec le conduit *CC*, il contient un baromètre de petite dimension, que l'on nomme *sproutette*. Ce baromètre est destiné à mesurer la force élastique du gaz intérieur pour faire juger de la marche de l'opération. On a pu lui donner des dimensions beaucoup plus petites qu'au baromètre ordinaire, parce qu'il n'a besoin d'indiquer la pression intérieure que lorsqu'elle est déjà très faible relativement à la pression atmosphérique.

Il est aisé de voir de quelle manière la force élastique de l'air contenu dans le récipient diminue, à mesure que la machine fonctionne. Admettons, par exemple, que la capacité de la partie du corps de pompe qui est au-dessous du piston, lorsqu'il est au bas de sa course, soit le tiers de celle du récipient *D* et du conduit *CC* réunis : lorsque le piston est au bas du corps de pompe, et qu'il s'élève jusqu'à sa partie supérieure, le volume de l'air contenu dans le récipient *D* et le conduit *CC* s'accroît dans le rapport de 3 à 1 ; la force élastique de cet air se réduit donc aux trois quarts de ce qu'elle était. Le piston s'abaissant ensuite, la force élastique de l'air du récipient ne varie pas. Ainsi chaque coup de piston a pour effet de réduire la force élastique du gaz contenu dans le récipient aux trois quarts de ce qu'elle était. Après le premier coup de piston, cette force élastique sera les $\frac{3}{4}$ de celle de l'air atmosphérique ; après le second, elle en sera les $\frac{9}{16}$; après le troisième, elle en sera les $\frac{27}{64}$, et ainsi de suite. On voit donc que, quelque grand que soit le nombre des coups de piston que l'on donne, il restera toujours de l'air dans le récipient ; mais la force élastique de cet air pourra être rendue aussi petite qu'on voudra.

Ce que nous venons de dire suppose que, chaque fois que le piston s'abaisse jusqu'au bas du corps de pompe, il oblige la totalité de l'air situé au-dessous de lui à le traverser, en soulevant la soupape *d*, pour se répandre dans l'atmosphère. Mais il est impossible de satisfaire complètement à cette condition : lorsque le piston est au bas de sa course, il reste toujours un peu d'air au-dessous de lui. Il en résulte que le mouvement ascendant du piston ne fait pas sortir autant d'air du récipient qu'il le ferait sans cela, puisque cet air qui est resté sous le piston, en se dilatant, se met en équilibre de pression avec l'air du récipient.

une portion notable du corps de pompe. L'influence nuisible la circonstance dont nous parlons se fait sentir de plus en mesure que la pression diminue dans le récipient; et il y a même un moment où elle empêche que cette pression diminue davantage : elle fait que la force élastique du gaz qui reste dans le récipient ne peut pas décroître au delà d'une certaine limite. On doit donc, dans la construction d'une machine pneumatique, se préoccuper surtout de faire en sorte que la face inférieure du piston s'applique le mieux possible sur le fond du corps de pompe.

La machine pneumatique, dont l'invention est due à Otto de Guericke, se composait d'abord d'une seule pompe aspirante, comme nous venons de décrire. Mais la manœuvre en était très pénible, surtout lorsqu'on avait déjà beaucoup diminué la force du gaz intérieur, en raison de ce qu'on avait à vaincre la pression atmosphérique, qui s'exerce toujours sur la face supérieure du piston, et qui n'était pas contre-balancée par la pression beaucoup plus faible agissant sur la face inférieure. C'est pour faciliter la manœuvre, que l'on a imaginé d'employer deux pompes aspirantes dont les pistons sont mis en mouvement en même temps et en sens opposés à l'aide d'une roue dentée qui engrène avec leurs tiges et les pistons dentés, *fig. 457*. Ces deux pistons, éprouvant l'un et l'autre la même pression atmosphérique sur leurs faces supérieures, exercent une force de traction de haut en bas sur la roue dentée; ces deux forces se font équilibre, et la manœuvre simultanée des deux pistons n'est pas plus difficile que si la pression atmosphérique n'existait pas du tout sur eux. Il n'y a de résistance à vaincre que celle qui provient de la différence de pression supportée de part et d'autre par les faces inférieures des deux pistons. Les deux pompes communiquent avec un conduit unique, qui est horizontal, puis se relève verticalement pour aboutir au récipient ou à la platine, comme dans la machine à un seul corps de pompe.

La machine pneumatique est généralement employée pour faire le vide dans des récipients de diverses natures, dans lesquelles on a besoin de diminuer la pression, ou au moins de diminuer la pression dans des capacités de petites dimensions. Nous allons voir cependant un exemple d'application de cette machine pour faire le vide dans un espace con-

Chemin de fer atmosphérique. — On a eu l'idée de faire vaincre la pression atmosphérique pour faire mouvoir les convois sur les chemins de fer. Si l'on imagine qu'un long tuyau

sur les chemins horizontaux ou peu inclinés, tels qu'ordinairement, peut donc en outre permettre de pentes, pour lesquelles l'action des locomotives si elle n'était pas complètement annulée (§ 494).

Le système de chemin de fer dont nous parlons par M. Clegg, et est connu sous le nom de *chemin sphérique*. Plusieurs essais en ont été faits. Nous en donnons pour exemple celui qui a été établi à l'extrémité du chemin de fer de Paris à Saint-Germain, et qui sert à gravir la rampe à cette dernière ville. D'immenses machines pompent l'eau vers le haut de la rampe, sont mises en mouvement par des machines à vapeur. La fig. 459 représente la coupe d'un des quatre corps de pompe de ces machines. On voit que ces quatre pompes aspirantes est à double effet. En supposant que le piston monte, il aspire l'air qui est ouverte au bas et à droite ; et en même temps il repousse l'air qui se trouve au-dessus de lui au dehors l'air qui se trouve au-dessus de lui à passer par l'ouverture de la soupape de gauche, supérieure du corps de pompe. Lorsque le piston descend, les deux soupapes qui sont ouvertes se ferment ; le piston repousse l'air qui occupent les autres angles de la figure, s'ouvre et aspire l'air dans la partie supérieure du corps de

vers laquelle puissent passer les pièces de jonction du wagon
 éton. Mais il faut que cette ouverture soit hermétiquement
 étanche, dans la partie du tube où l'on fait le vide, afin que
 l'extérieur ne puisse pas la traverser, pour venir remplacer u

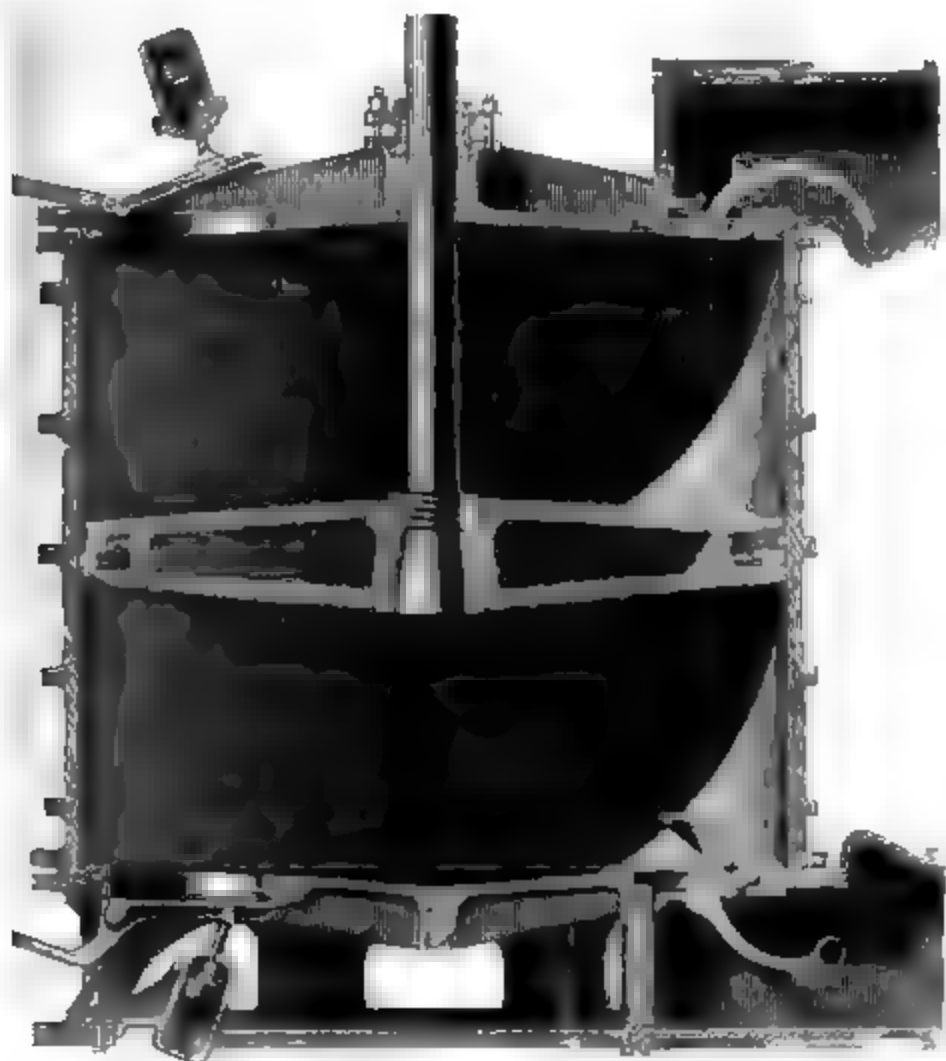


Fig. 459. (Échelle de 22 millimètres pour mètre.)

que instant l'air qui est enlevé par les machines pneumatiques.
 r atteindre ce but, on a disposé, dans toute la longueur du
 , une soupape formée d'une bande de cuir, longue et étroite,
 . un des bords est fixé au tube, d'un côté de l'ouverture longi-
 nale. Cette soupape est renforcée par des plaques de tôle fixées
 sa face supérieure, et n'en conserve pas moins une certaine



Fig. 460.

flexibilité, en raison de ce que ces sont petites et nombreuses. Elle s'habituellement sur les deux bords de ture, qu'elle ferme ainsi complètement elle est soulevée successivement dans ses parties de sa longueur, à mesure piston marche dans le tube en entr convoi, afin de laisser passer les p établissent la liaison entre ce piston et mier wagon.

La fig. 460 représente l'ensemble reils qui constituent le piston moteur. proprement dit est en A ; il est mun son contour d'une bande de cuir qui sur les parois intérieures du tube, afin cher l'air de passer entre ces parois et Un second piston B, placé en avant mier, est destiné à le suppléer au l s'opposant au passage de l'air qui n été arrêté par le premier piston. La mune à ces deux pistons est fixée à l d'une sorte de châssis long et étroit plaque de tôle D, attachée à ce châs relier le piston au wagon qui est sit sus, cette plaque sort du tube en bant, pour passer autour du bord de sans que celle-ci ait besoin d'être tr

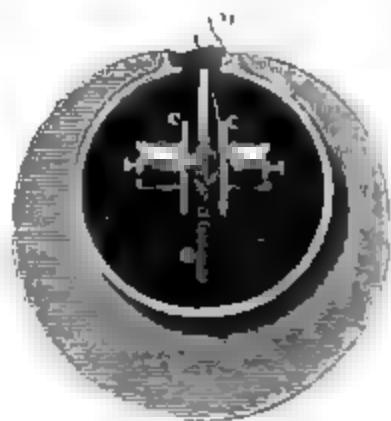


Fig. 461.

fig 461. A l'extrémité postérieure, CC. est adaptée une pièce de fonte

contre-poids aux pistons A, B, afin que le centre de gravité de l'appareil soit sensiblement placé au milieu de la plaque de fer qui le supporte. Le châssis CC porte deux pièces F, F, qui ont pour objet de soulever la soupape longitudinale du tube; cinq leviers G, G, dont les axes sont également supportés par le châssis CC reposent sur la face inférieure de cette soupape H, *fig. 461*, maintenant suffisamment ouverte, pour que la pièce D puisse descendre librement, et aussi pour que l'air extérieur puisse rentrer. On voit que le piston s'avance dans le tube.

On n'emploie la pression atmosphérique, pour faire mouvoir les wagons, que lorsqu'ils montent la rampe qui conduit à Saint-Germain.

La seule action de la pesanteur suffit pour les faire descendre au bas de cette rampe, jusqu'au point où finit le tube atmosphérique, et où des locomotives viennent les remorquer. Si l'on veut remonter de la même voie pour la descente que pour la montée, tout est disposé par le jeu des pistons A, B, et du châssis CC, avec ce qu'il porte, pour parcourir le tube atmosphérique en sens contraire. Pour qu'il ne résulte pas de trop grands frottements, on fait basculer les pistons A, B, de manière à leur donner la position oblique qui est représentée sur la *fig. 460*. A cet effet, une tringle *ab* est articulée d'une part au piston A, et d'une autre part au levier *bcd*, mobile autour du point *c*; une seconde tringle *de* relie le levier *bcd* à un levier *ef*, qui traverse l'ouverture de la soupape, en passant le long de la plaque D, et peut être manœuvré de l'intérieur du wagon. En tirant sur ce levier *ef*, de manière que son extrémité inférieure *e* sorte vers la droite de la figure, on pousse la partie inférieure du piston A vers la gauche, et on l'amène ainsi à prendre la position oblique dont nous venons de parler. Une tringle, articulée d'une part au piston A, d'une autre part au piston B, fait que ce second piston se place de la même manière que le premier.

C'est le système de chemin de fer que nous venons de décrire fonctionnant depuis plusieurs années à Saint-Germain, et a très bien réussi, mais il est extrêmement coûteux, et ce n'est que dans des circonstances exceptionnelles qu'on pourrait l'employer avec avantage.

36. Machines aspirantes. — Nous avons indiqué (§ 265) un moyen qui est très employé pour produire artificiellement l'effet d'une mine, et qui consiste à établir un foyer vers le bas du tube, pour déterminer un courant d'air par les différences de température. Mais on se sert aussi, pour atteindre le même but, de machines destinées à mettre en mouvement la masse d'air contenue à l'intérieur de la mine.

Pour qu'il y ait renouvellement de l'air intérieur, il faut que la cavité souterraine communique par deux voies d'avec l'air extérieur, soit par deux puits distincts, soit par deux portions d'un même puits, que l'on a isolées l'une de l'autre par un moyen d'une cloison qui s'étend dans toute sa profondeur. Le mouvement qu'il s'agit de produire a pour effet de faire entrer l'air atmosphérique par un des deux puits, s'il y en a deux, et de le faire circuler dans les différentes parties de la mine qu'il doit être aérées, et ensuite de le faire remonter par l'autre puits pour y arriver. On emploie souvent des machines aspirantes installées à l'orifice du puits par lequel on veut faire sortir l'air, ce sont de véritables machines pneumatiques, dont la différence qu'elles doivent extraire du puits une grande quantité d'air, en n'y déterminant qu'une très faible diminution de pression. A mesure que la machine fonctionne, l'air de la mine se raréfie, et marche, pour combler le vide qu'elle tend à opérer; et il y a une circulation continue de cet air.

Ces machines aspirantes présentent habituellement la même position que la machine pneumatique. Ce sont de vastes réservoirs ouverts par le haut, dont le fond est percé de larges ouvertures munies de soupapes, et dans lesquels se meuvent des pistons également d'ouvertures à soupapes. Nous indiquerons une disposition particulière, qui est très employée dans le Harz, et qui a pour objet de faire disparaître complètement les frottements des pistons contre les parois des cylindres. Deux cloches cylindriques A, A', fig. 462, sont attachées aux deux extrémités d'un balancier B, au moyen de chaînes C, C'. Le mouvement oscillatoire que l'on donne au balancier B fait élever et abaisser successivement ces cloches, qui plongent dans des cuves remplies d'eau. Les tuyaux D, D' s'élèvent au milieu de ces cuves, jusqu'à la surface de l'eau, et communiquent par leur extrémité inférieure avec un conduit E, par lequel l'air de la mine est aspiré, l'orifice supérieur de chacun de ces tuyaux étant fermé par une soupape s'ouvrant de bas en haut. Les cloches A, A' sont d'ailleurs percées, dans le haut, d'ouvertures garnies de soupapes qui s'ouvrent dans le même sens. Lorsqu'une cloche s'élève, sa soupape se ferme, et l'air de la mine se retire, en passant par le tuyau D, dont la soupape s'ouvre. Lorsque ensuite cette cloche s'abaisse, la soupape du tuyau D se ferme, celle de la cloche s'ouvre, et l'air contenu à l'intérieur est expulsé au dehors. Le niveau de l'eau de chaque

le même à l'intérieur de la cloche et à l'extérieur, en raison de ce que la force élastique de l'air contenu dans la cloche est la plus grande, tantôt plus petite que celle de l'air atmosphé-

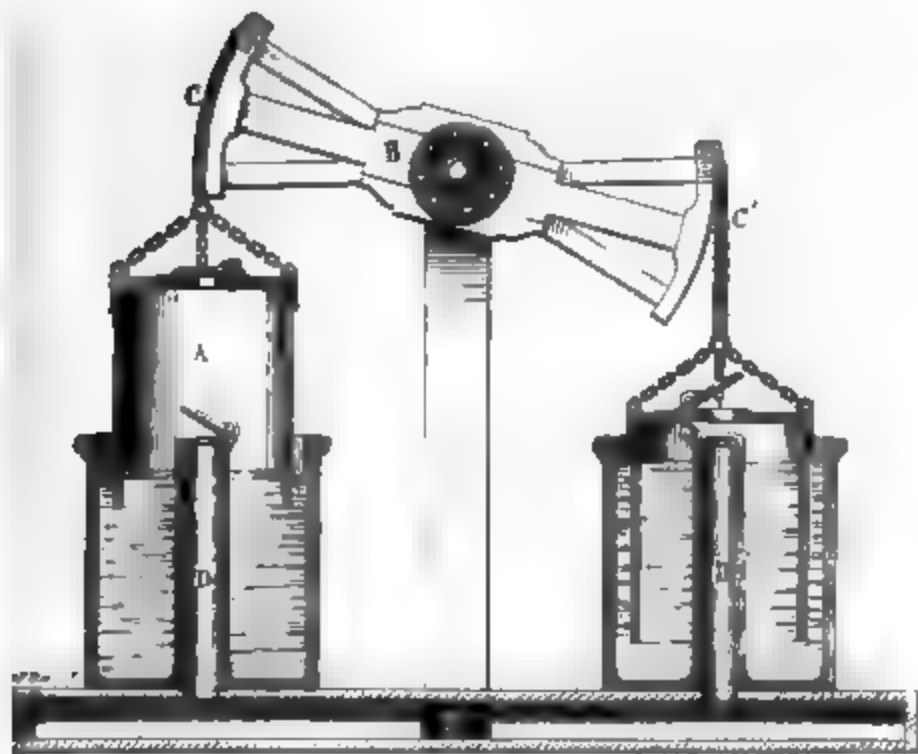


Fig. 462.

re; mais ces variations de force élastique sont assez faibles pour qu'il n'en résulte pas de différences de niveau considérables pour le guide. On voit que ce moyen d'éviter les frottements d'un piston contre les parois du cylindre dans lequel il se mouvrait, n'est applicable qu'autant que l'on n'a pas à produire de grands changements dans la force élastique du gaz sur lequel la machine doit agir.

397. **Machine de compression.** — Quand on veut accumuler une grande quantité d'air dans un espace fermé, on se sert de la machine de compression, qui est exactement pareille à la machine pneumatique représentée par la fig 457 (page 580), si ce n'est que toutes les soupapes sont disposées en sens inverse, c'est-à-dire qu'elles s'ouvrent de haut en bas. Lorsqu'un des pistons s'élève, sa soupape s'ouvre, et celle qui est au bas du corps de pompe se ferme; l'air extérieur, en traversant le piston, vient remplir la portion du corps de pompe qui est au-dessous de lui. Lorsque ensuite le piston s'abaisse, sa soupape se ferme; il comprime l'air qui

vient de le traverser, et le fait ainsi passer dans le récipient, en ouvrant la soupape qui se trouve au bas du corps de pompe. Il suffit donc de donner un mouvement de va-et-vient à chacun des deux pistons, pour introduire constamment de nouvelles quantités d'air dans le récipient, qui a besoin en conséquence d'être forté et maintenu, pour résister à la pression de l'air intérieur. Un manomètre à air comprimé (§ 264) remplace l'éprouvette de la machine pneumatique, et sert à faire connaître la force élastique de l'air intérieur à chaque instant.

C'est à l'aide d'une machine de compression, analogue à celle dont nous venons de parler, mais qui se réduit à une simple pompe foulante, que l'on comprime de l'air dans la crosse des fusils connus sous le nom de *fusils à vent*. Cet air comprimé est destiné à remplacer la poudre, pour donner une impulsion aux projectiles introduits dans le canon du fusil. Lorsqu'on veut faire partir ces projectiles, il suffit de lâcher une détente, qui laisse sortir une certaine quantité d'air de la crosse; cet air, ne pouvant s'échapper que par l'intérieur du canon, chasse devant lui les corps qu'on y a précédemment introduits.

§ 398. **Soufflets** — Les soufflets, dont on se sert pour activer la combustion dans les foyers d'appartements ne sont autre chose que des machines destinées à puiser de l'air dans l'atmosphère, pour le lancer avec une certaine vitesse sur le combustible en ignition.

Le soufflet ordinaire est formé de deux plaques de bois terminées chacune par un manche A, B, fig. 463, et réunies l'une à l'autre par une pièce de cuir flexible, qui laisse entre elles un espace C fermé de toutes parts. Une ouverture D, percée dans la plaque inférieure, est recouverte en dedans d'un morceau de



Fig. 463.

cuir flexible, qui n'est attaché qu'en quelques points de son contour, et fait fonction de soupape. Ce morceau de cuir s'applique sur l'ouverture D, et la ferme complètement, lorsque l'air intérieur tend à sortir, tandis que, si l'air extérieur tend à pénétrer dans le soufflet par l'ouverture D, il soulève facilement le cuir, et peut ainsi entrer librement. Un tuyau allongé et conique E termine le soufflet; c'est par ce tuyau que l'air doit être lancé de l'intérieur à l'extérieur. Pour manœuvrer le soufflet, on saisit un des manches A, B, dans chaque main, et l'on fait mouvoir le manche B de manière à

à le rapprocher alternativement de l'autre. En vertu de ce mouvement, la capacité intérieure C augmente et diminue alternativement. Lorsque cette capacité augmente, il se forme un vide relatif et l'air atmosphérique s'y introduit à la fois par les tuyaux D, E, mais surtout par la première D, qui est plus large. Au contraire les deux manches A, B, se rapprochent l'un de l'autre, l'air intérieur est comprimé, et ne pouvant sortir par la première D, qui est alors fermée, il est obligé de s'échapper en sortant par le tuyau E.

Ces deux vents ne sortent que par intermittence du soufflet dont nous venons de parler, et de plus, au moment où se fait l'aspiration, l'air extérieur tend à entrer aussi bien par le tuyau E que par l'ouverture D, ce qui peut arriver que de la flamme entre par ce tuyau, et se répand dans l'intérieur du soufflet. Pour obvier à ces deux inconvénients on a imaginé les soufflets dits à double vent. Un soufflet de ce genre est formé de trois plaques de bois, dont deux seulement sont mobiles, et terminées par des manches A, B, fig. 464. Entre ces plaques sont disposées, comme on le voit, deux pièces de cuir qui forment deux compartiments, C, F. Le premier compartiment, C, communique avec l'extérieur par l'ouverture D, garnie d'une soupape de cuir pareille à celle que nous avons déjà

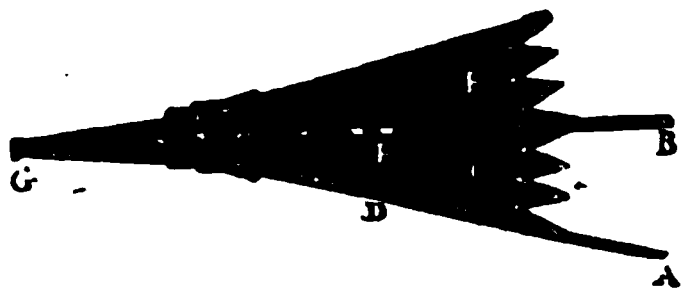


Fig. 464.

communique en outre avec le second compartiment F, par l'ouverture E garnie d'une soupape du même genre. A l'extrémité du second compartiment F, existe un conduit aboutissant au tuyau G, par lequel l'air doit être lancé. Lorsqu'on écarte les deux manches A, B, la soupape E se ferme, la soupape D s'ouvre ; et l'air pénètre dans le compartiment C. Lorsque ensuite on rapproche les deux manches A, B, la soupape D se ferme, la soupape E s'ouvre et l'air passe de C en F. Un petit ressort intérieur tend constamment à rapprocher l'une de l'autre les deux plaques de bois qui forment le compartiment F. Au moment où l'air passe de C en F, ce petit ressort cède, et permet à l'espace F de se dilater pour le contenir ; mais il réagit bientôt, et en comprimant l'air, il l'oblige à sortir par le tuyau G. Si l'on continue à écarter les manches A et B, en les éloignant et en les rapprochant alternativement l'un de l'autre, de nouvelles quantités d'air entrent à chaque instant de C en F, avant que la réaction du res-

sort ait en le temps d'expulser la totalité de l'air qui s'était précédemment introduit dans le second compartiment F. La sortie de l'air par le tuyau G n'éprouve donc pas d'interruption, et le jet qui en sort présente une régularité d'autant plus grande que le mouvement des manches A et B est plus rapide, ce qui ne permet pas à la tension du ressort contenu en F de varier dans des limites trop étendues.

§ 399. **Machines soufflantes** — Pour lancer de l'air à l'intérieur des fourneaux, dans les usines, on emploie des machines soufflantes de diverses formes, mises en mouvement, soit par des roues hydrauliques, soit par des machines à vapeur. Quelquefois ce sont d'immenses soufflets analogues aux soufflets que nous venons de décrire, d'autres fois ce sont des machines à piston, en tout pareilles à la machine pneumatique représentée par la fig. 459 page 585. Ici ce n'est que les soupapes s'ouvrent en sens contraires. Lorsqu'on emploie ces dernières machines, l'air qu'elles puisent dans l'atmosphère est refoulé par elles dans des tuyaux qui le conduisent aux différents orifices par lesquels il doit s'échapper. La régularité de la vitesse avec laquelle l'air est lancé étant d'une grande importance pour la marche des fourneaux, on emploie souvent pour l'obtenir un moyen analogue à celui que nous avons trouvé dans le soufflet à double vent. Ce moyen consiste à placer sur le chemin que doit parcourir l'air, à sa sortie de la machine, un réservoir cylindrique, fig.

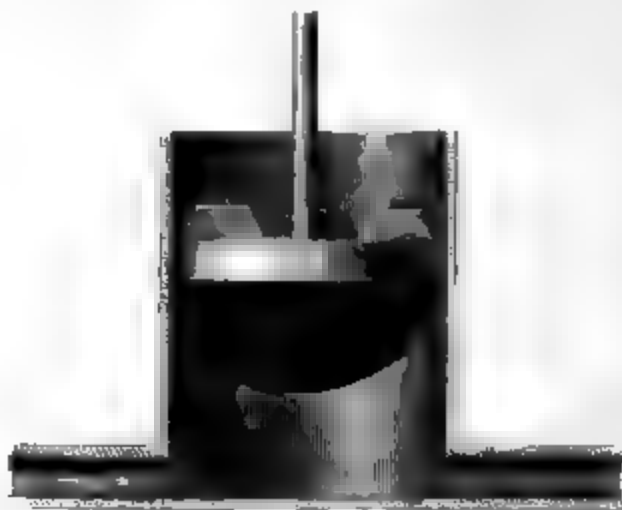


Fig. 465.

465, dans lequel se trouve un piston chargé de poids et libre de monter ou de descendre en glissant sur les parois du réservoir. L'air fourni par la machine arrive dans ce réservoir d'un côté, et en sort de l'autre. Au moment où une grande quantité d'air vient se rendre dans cette capacité intermédiaire, le piston s'élève; il s'abaisse, au contraire, lorsque l'air arrive en moins

grande abondance : en sorte que la force élastique de l'air contenu au-dessous du piston régulateur reste à très peu près la même, et la vitesse avec laquelle il sort du réservoir ne varie pas sensiblement.

se sert encore des machines soufflantes pour produire l'aérage des mines. A cet effet, on installe une machine de ce genre à l'entrée du puits par lequel on veut faire descendre l'air puisé dans l'atmosphère, pour établir un courant destiné à parcourir les galeries souterraines, et à remonter par un autre puits. Mais les machines employées pour l'aérage des mines diffèrent de celles qui sont destinées à lancer l'air dans des fourneaux, en ce que les premières doivent faire mouvoir une grande quantité de gaz avec une faible vitesse, tandis que les autres sont destinées à communiquer une vitesse considérable à une quantité de gaz beaucoup plus grande.

§ 400. **Ventilateurs.** — Supposons que l'on fasse tourner rapidement, à l'intérieur d'un cylindre, et autour de son axe, des palettes disposées de manière à entraîner avec elles l'air au milieu duquel elles se meuvent. Cet air, prenant ainsi un mouvement rapide de rotation, donnera lieu au développement de forces centrifuges (§ 409) qui tendront à l'éloigner de l'axe du cylindre, pour l'accumuler vers sa surface. Si le cylindre est fermé de toutes parts, la pression ne restera pas la même dans toute l'étendue de la masse d'air qu'il contient; cette pression diminuera dans le voisinage de l'axe, et augmentera dans les points qui en sont le plus éloignés. Les choses étant dans cet état, si l'on vient à établir une communication de l'atmosphère avec la partie centrale du cylindre, et à pratiquer une ouverture qui permette à l'air accumulé vers la surface de se débarrasser, il se produira un mouvement continu du gaz, qui entrera par le centre, et sortira par la circonférence. La machine ainsi obtenue est ce que l'on nomme ventilateur.

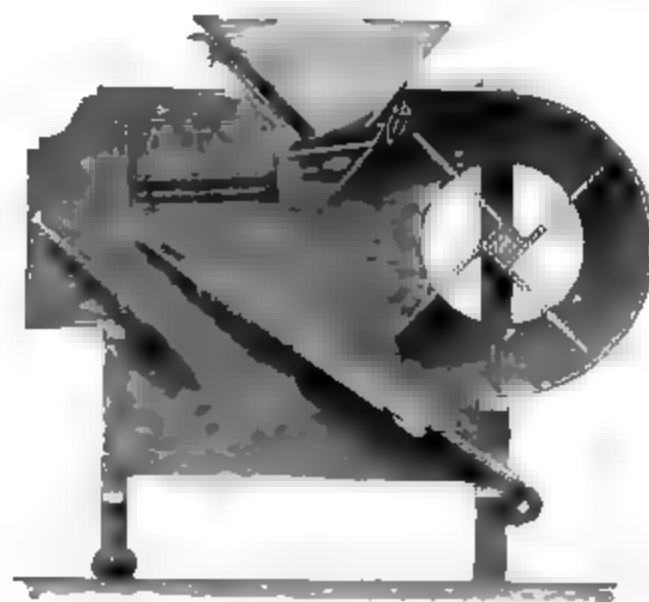


Fig. 466.

Quelquefois les palettes du ventilateur sont planes, et di-

suivant des rayons du cylindre dans lequel elles se trouvent. On en a un exemple dans le *tarare*, fig. 466, dont on se sert pour nettoyer les grains. Le courant d'air déterminé par la rotation des palettes a ici pour objet d'entraîner les poussières et les extra de paille, afin de les séparer du grain, qui ne cède pas aussi facilement à l'action du courant, en raison de ce que, à égalité de surface, il est beaucoup plus pesant.

Les fig. 467 et 468 représentent le ventilateur qui est habituellement employé comme machine soufflante pour lancer de l'air dans les fourneaux des usines. Ses palettes sont légèrement courbées en sens contraire du sens dans lequel elles se meuvent, de sorte qu'elles abandonnent plus facilement l'air avec lequel elles sont en

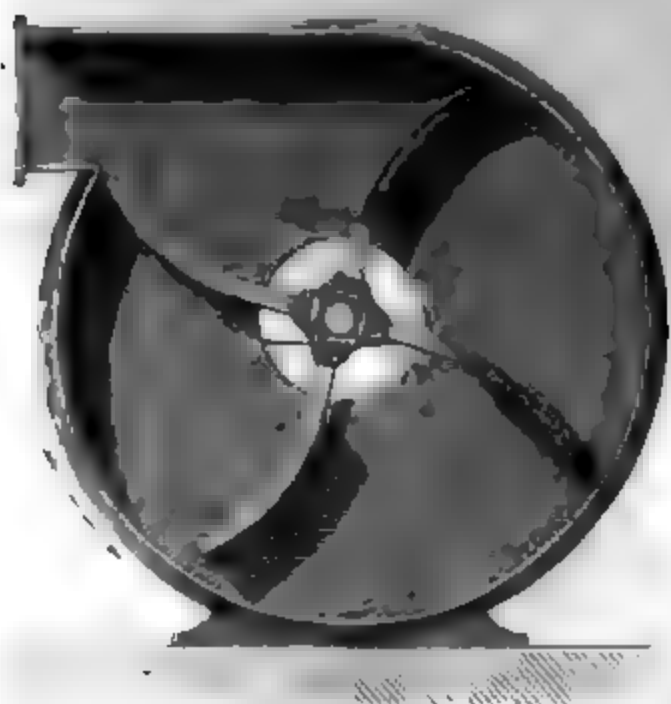


Fig. 467.

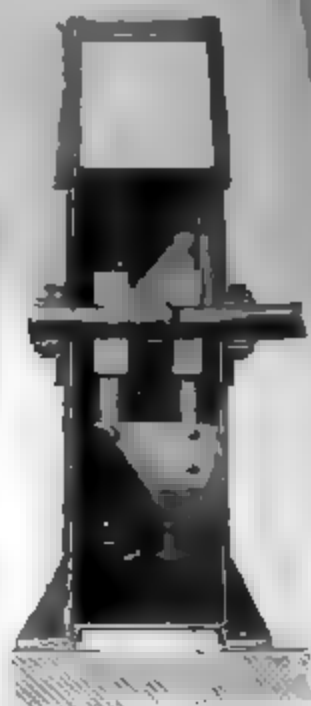


Fig. 468.

contact au moment où elles passent devant le tuyau de dégagement que l'on voit au haut de la fig. 467. Les ventilateurs de ce genre reçoivent ordinairement un mouvement extrêmement rapide. Ils projettent l'air avec une grande régularité dans le tuyau avec lequel ils sont mis en communication.

On se sert quelquefois d'un ventilateur pour aspirer l'air d'un puits de mine, afin de déterminer le courant nécessaire à l'aérage de la mine. Pour cela, on installe l'appareil à l'orifice même du

l'orifice
duit qui
munica-
s; et l'on
e l'air du
brement
lu venti-
que sa
est ou-
es parts
ère. Les
représen-
ateur de
la dispo-
quée par
s palet-
a, et diri-
contraire
it qu'on
tte forme
our objet
orte que
ne faible
ment ou
iné dans
ar la ma-
ssant sur
sens con-
dans le-
meuvent,
ue, après
machine,
différence
du ven-
esse pro-
ettes Ici
sont pas
des bras
central;
tées à un
re qui for-

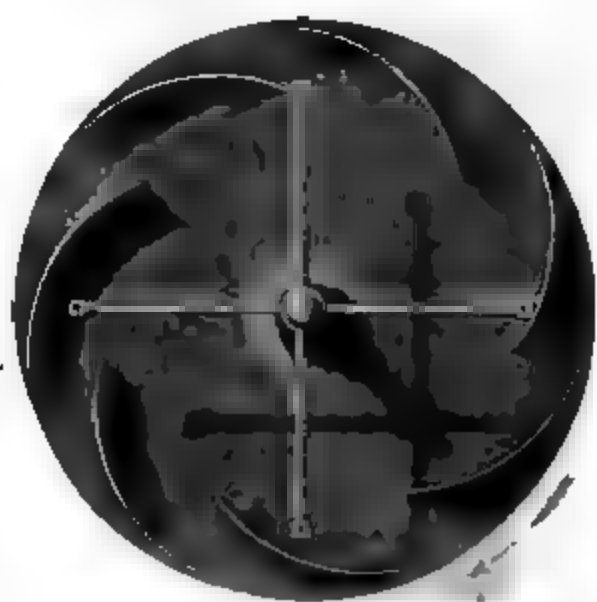


FIG. 460.

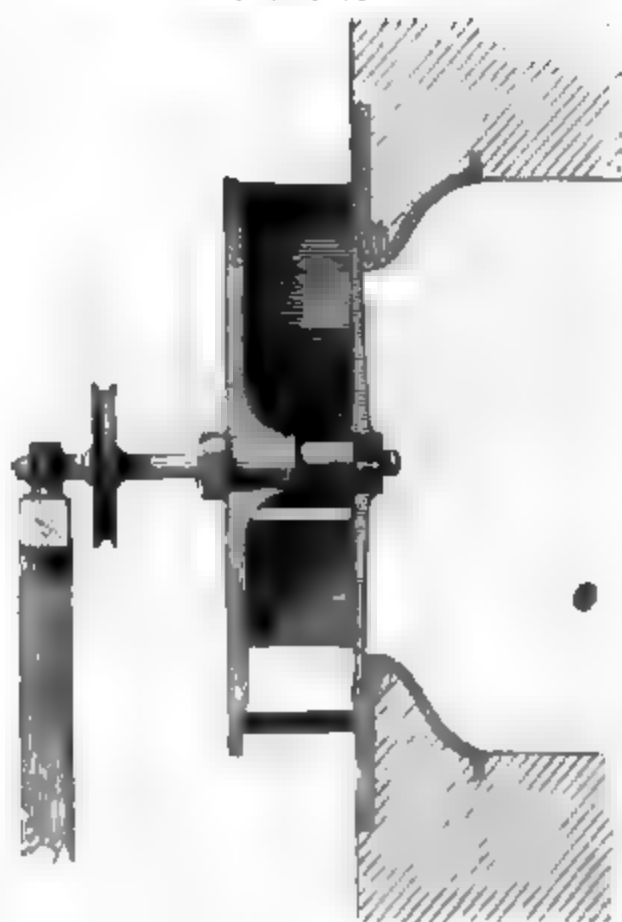


FIG. 470.

ventilateur opposée à celle par laquelle l'air est aspiré

596 MACHINES QUI SERVENT A FAIRE MOUVOIR LES EAUX.

de l'intérieur de la mine : ce disque est fixé à l'arbre, et tourne avec lui en entraînant les palettes.

§ 401 **Vis pneumatique.** — On se sert encore quelquefois pour l'aérage des mines, de l'appareil représenté par la fig. 471, qui

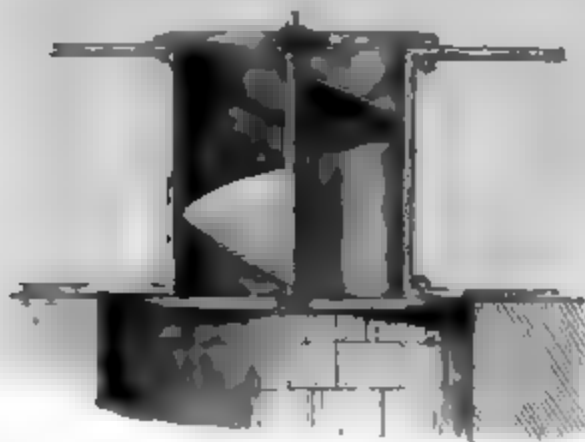


Fig. 471.

siste en une vis à filets, mobile autour d'un axe vertical à l'intérieur d'un cylindre fixe. Cette vis, qui est une vis pneumatique, a une grande similitude avec l'hélice fig. 395 (page 470) et fonctionne à peu près de la même manière que le siphon de bateau, en produisant un mouvement de translation du bateau, et donne en même

temps un mouvement de rotation du bateau, et donne en même temps un mouvement en sens contraire. Si le bateau était fortement amarré au rivage, l'hélice ne se déplacerait plus en tournant ; mais elle agirait toujours sur l'eau, et son effet serait même augmenté par l'impossibilité dans laquelle elle se trouverait de céder à la pression mutuelle qui s'exerce entre sa surface et le liquide ; la rotation de l'hélice donnerait d'autant plus de courant d'autant plus rapide qu'elle tournerait plus vite. précisément ce que produit la vis pneumatique dont nous nous servons maintenant. Si on la fait tourner rapidement dans un sens, elle produit un courant d'air descendant, et agit comme machine aspirante, à l'orifice du puits sur lequel elle est installée. Il est clair que, si on la faisait tourner en sens inverse, elle donnerait lieu à un courant descendant, et agirait comme machine soufflante.

§ 402. **Cagniard-Latour.** — Pour faire comprendre le principe de la vis d'Archimède (§ 343), nous avons considéré un appareil consistant en un simple tube de verre enroulé autour d'un cylindre, en forme de filets de vis, fig. 398 (page 470). Nous avons dit que, si l'on faisait tourner cet appareil dans un sens, et que l'extrémité inférieure du tube plongeait, pendant une portion de chaque tour, dans un réservoir d'eau, des quantités d'eau seraient successivement puisées par la partie inférieure

, et monteraient à la suite les unes des autres en se plaçant au bas de ces diverses spires, en sorte que ce liquide viendrait déverser par l'extrémité *b* du tube, de laquelle sortirait, à tour, la quantité de liquide contenue dans une des spires. Prenons maintenant que le même appareil soit plongé dans un air d'eau dont le niveau soit plus élevé, de manière que, l'extrémité *a* restant toujours sous l'eau, pendant la rotation, l'extrémité *b* entre dans le liquide et en sorte alternativement à chaque tour. Concevons de plus que le mouvement de rotation donné au tube soit de sens contraire à celui qu'on lui donnait précédemment, il s'agirait d'élever de l'eau. Il est aisé de voir qu'au moment où l'extrémité *b* du tube, en s'abaissant, vient rentrer dans l'eau, une certaine quantité d'air est emprisonnée dans ce tube; et si le mouvement de rotation continue, cette quantité d'air, tout en occupant toujours le haut de la spire dans laquelle elle est engagée, se mouvra le long du tube, en se rapprochant de l'extrémité *a*. A chaque tour, une nouvelle quantité d'air s'introduit dans le tube, ces quantités d'air viendront occuper successivement les parties supérieures des diverses spires, et, à chaque tour, l'une d'elles se dégagera en *a*. On conçoit dès lors que l'appareil, employé de cette manière, peut devenir le type d'une machine soufflante.

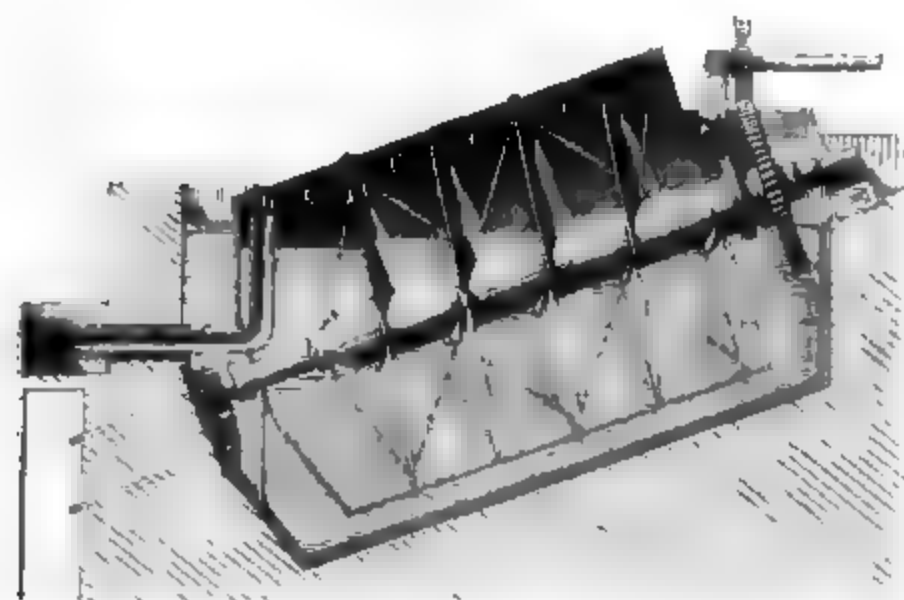


Fig. 472.

Cette idée a été réalisée par M. Cagniard-Latour. La machine soufflante qu'il a construite d'après ce principe est désignée sous le nom de *cagniardelle*. Elle se compose d'un arbre *AB*, fig. 472, au-

598 MACHINES QUI SERVENT A FAIRE MOUVOIR LES CH.

quel est fixée une cloison hélicoïdale de tôle, terminée extérieurement à un cylindre également de tôle. Le tout est placé dans une position inclinée, à l'intérieur d'un réservoir contenant de l'eau, et est mis en mouvement au moyen d'engrenages. L'air qui s'introduit à chaque tour dans l'espace compris entre les spires de la cloison vient occuper successivement les parties C, C', C'', C''', de cet espace, en se comprimant de plus en plus, et déterminant par conséquent un abaissement progressif de la surface de l'eau avec laquelle il est en contact. Arrivé en C', il pénètre dans le tuyau D, où il entre en vertu de l'excès de sa force élastique sur celle de l'air atmosphérique, ce tuyau le conduit au fourneau dont il doit alimenter la combustion.

§ 403. **Trompe** — Nous avons déjà vu dans le bélier hydraulique (§ 392), un exemple dans lequel l'eau d'une chute agit directement pour produire du travail utile, sans que sa force ait besoin d'être transmise à une machine motrice, comme cela a lieu ordinairement. nous allons en voir un autre exemple dans la *trompe*, machine soufflante qui est très employée dans les pays de montagnes. Cette machine se compose essentiellement d'un tuyau vertical de bois

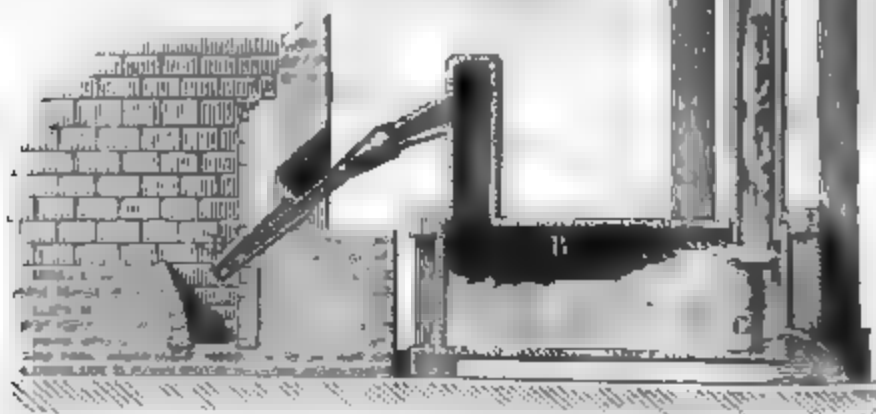


Fig. 473.

fig 473, dans lequel on laisse tomber l'eau du bief supérieur. Le haut du tuyau est muni d'une espèce d'entonnoir conique par lequel

l'air s'introduit à son intérieur ; cet entonnoir donne lieu à la formation d'une veine liquide, qui n'occupe pas toute la largeur du tuyau, et qui tend à entraîner dans son mouvement l'air qui se rassemble autour d'elle. Des ouvertures A, A, permettent à cet air intérieur de suivre en effet le mouvement descendant de l'eau, sans qu'il en résulte un vide dans le haut du tuyau, puisque l'air entré de cette manière est remplacé immédiatement par l'air extérieur, qui entre par ces deux ouvertures A, A. Par cette disposition, l'intérieur du tuyau est constamment parcouru de haut en bas par un mélange d'air et d'eau. Le tuyau débouche inférieurement dans une caisse fermée B. La colonne descendante vient se briser sur une petite tablette C, destinée à faciliter la séparation de l'air et de l'eau. L'air se loge dans le haut de la caisse, et y possède une force élastique supérieure à celle de l'air atmosphérique : en vertu de l'excès de force élastique, il se rend par le tuyau D à l'intérieur du fourneau voisin, ou bien encore dans un puits de mine qu'il sert à aérer. Quant à l'eau qui tombe au fond de la caisse B, elle s'écoule constamment au dehors, par une ouverture que l'on voit au-dessous de la tablette C.

Le jet gazeux produit par une trompe présente une très grande clarté. Mais cette machine est peu avantageuse sous le rapport de l'économie du travail : la quantité de travail moteur qui serait nécessairement nécessaire pour produire la compression de l'air dans la caisse B n'est guère que les 0,45 du travail moteur, qui correspond à la quantité d'eau dépensée.

Lorsque, par suite d'une explosion dans une mine, on a besoin de produire promptement un renouvellement de l'air, on a recours quelquefois à un moyen qui est fondé sur le même principe que la trompe. Ce moyen consiste à détourner le cours d'un ruisseau voisin, et à en faire couler l'eau dans le puits : cette eau entraîne avec elle une quantité d'air considérable, qui permet de descendre dans la mine pour porter secours aux ouvriers blessés, et aussi pour reprendre les travaux que l'explosion a interrompus.

EMPLOI DU VENT COMME MOTEUR.

404. Les mouvements de l'air atmosphérique peuvent être employés pour produire du travail, tout aussi bien que le mouvement de l'eau dans les cours d'eau. Cette source de travail ne se rencontre seulement dans quelques localités ; elle existe partout, et en grande abondance. Aussi le vent serait-il un moteur des plus précieux, s'il agissait avec une certaine régularité. Mais l'extrême

irrégularité de son action, résultant des fréquentes variations de son intensité et de sa direction, fait qu'on ne peut pas y recourir pour effectuer un travail qui demande de la continuité, ne permette pas de trop grands changements dans les mécanismes employés à sa production.

Les appareils destinés à recevoir l'action du vent pour mettre aux pièces qui ont des résistances à vaincre sous les mêmes conditions que les roues à palettes que l'on installe dans un courant d'une rivière (§ 380). Ils ne doivent utiliser qu'une force extrêmement faible du travail que la masse totale de l'instrument est capable de produire, d'ailleurs, on n'est pas restreint dans leurs dimensions dans d'étroites limites, on n'a pas à se préoccuper de la forme de ces appareils autant qu'il faut le faire s'il s'agissait d'utiliser la plus grande portion de la puissance d'un courant d'air limité. La simplicité de construction et la facilité des réparations sont les conditions principales qu'on doit chercher à remplir dans la disposition de ces appareils de ce genre. Quant à la grandeur du travail qu'ils pourront effectuer, elle variera suivant qu'on leur donnera des dimensions plus ou moins considérables.

§ 405. **Navires à voiles.** — Le vent est le moteur employé dans la navigation sur mer; il a même été le seul pendant bien longtemps, et ce n'est que dans le siècle actuel que la vapeur lui a été substituée dans un certain nombre de cas. Le peu de régularité de l'action du vent se fait nécessairement sentir dans la marche du navire, qui lui emprunte sa force. Tantôt le calme de l'atmosphère l'oblige à rester dans l'immobilité presque complète pendant un temps plus ou moins long, au contraire, la violence du vent l'expose aux plus grands dangers. D'un autre côté, lorsque la vitesse du vent ne sort pas de la mesure qui convient à une bonne navigation, sa direction très différente de celle de la route que l'on veut suivre.

Pour qu'un navire puisse recevoir du vent l'action nécessaire à sa marche, on le surmonte d'un grand appareil de cordages, destiné à porter les voiles sur lesquelles exercer sa pression. Ces voiles sont de grandes surfaces qui peuvent se développer et se replier à volonté, et ainsi elles peuvent donner des directions différentes, suivant les besoins. Le navire doit se mouvoir précisément dans la direction du vent, le même sens que lui, il est clair qu'il suffit de disposer les voiles de manière que leurs surfaces soient perpendiculaires au vent, le vent venant les rencontrer de face, exerce

tion qui est dirigée dans le sens de cet axe, et qui détermine le mouvement de progression dans le même sens. Mais si la direction du vent n'est pas la même que celle du chemin qu'on veut parcourir, on est obligé de donner aux voiles une position oblique par rapport à la longueur du navire, et, en outre, de faire en sorte que le vent arrive obliquement sur leur surface. Le vent, en glissant sur les voiles, exerce sur elles une pression qui leur est toujours perpendiculaire, et qui a, en conséquence, une direction différente de celle du mouvement de l'air; d'un autre côté, la marche du navire n'ayant pas lieu exactement dans le sens de sa longueur, et le gouvernail étant tourné plus ou moins dans un sens convenable (§ 332), il en résulte une résistance du liquide qui est oblique par rapport à la direction de cette marche. Si l'on observe que la résultante des pressions que l'air exerce sur le navire, pressions qui sont supportées en très grande partie par les voiles, doit constamment avoir la même direction que la résistance opposée par le liquide, on verra que les deux causes qui viennent d'être signalées concourent pour produire une obliquité plus ou moins grande de la direction du mouvement du navire sur celle du vent qui le détermine.

En agissant convenablement sur la position des voiles, et sur le gouvernail, on peut faire en sorte que cette obliquité devienne très grande, on peut même arriver à faire marcher le navire en sens contraire du vent. Quand on remonte, pour ainsi dire, le courant d'air qui produit le mouvement du navire, en cherchant à faire faire à la direction de ce mouvement le plus petit angle possible avec la direction d'où vient le vent, on dit qu'on marche *au plus près du vent*; l'angle formé par ces deux directions peut être réduit jusqu'à 65° , et même 60° dans les circonstances les plus favorables. En marchant ainsi au plus près, tantôt d'un côté du vent, tantôt de l'autre, de manière à faire des zigzags, on parvient à se transporter en définitive exactement en sens contraire du vent: c'est ce que l'on appelle *louvoyer*.

§ 406. *Moulins à vent*. — La force du vent est employée depuis un temps immémorial pour faire mouvoir des moulins à farine, auxquels on donne le nom de *moulins à vent*. La fig. 474 montre la disposition de ces machines. Un arbre AB, susceptible de tourner sur lui-même, dans les coussinets qui le supportent, est disposé dans la direction même du vent. Il fait un angle de 40 à 45 degrés avec l'horizon. Cette inclinaison a été adoptée, parce que l'on a observé que le mouvement de l'air n'est généralement pas horizontal, mais que sa direction fait ordinairement un petit angle avec la surface de la terre. Quatre bras sont fixés à cet arbre, à son extrémité

A, perpendiculairement à sa longueur, de manière à former une sorte de croix, chacun de ces bras sort d'axe à une surface à peu près rectangulaire, C, beaucoup plus longue que large, qui est destinée à recevoir l'action du vent, et que l'on nomme une *aile*. On donne souvent aux ailes une largeur de 2^m, et une longueur de 11^m : l'extrémité la plus rapprochée de l'arbre AB en est à une distance de 2^m : ce qui fait que l'espèce de roue formée par l'ensemble des quatre ailes a un diamètre de 26^m. Chaque aile est formée de barreaux de bois qui sont implantés transversalement de distance en distance dans la pièce de bois qui lui sert d'axe, et

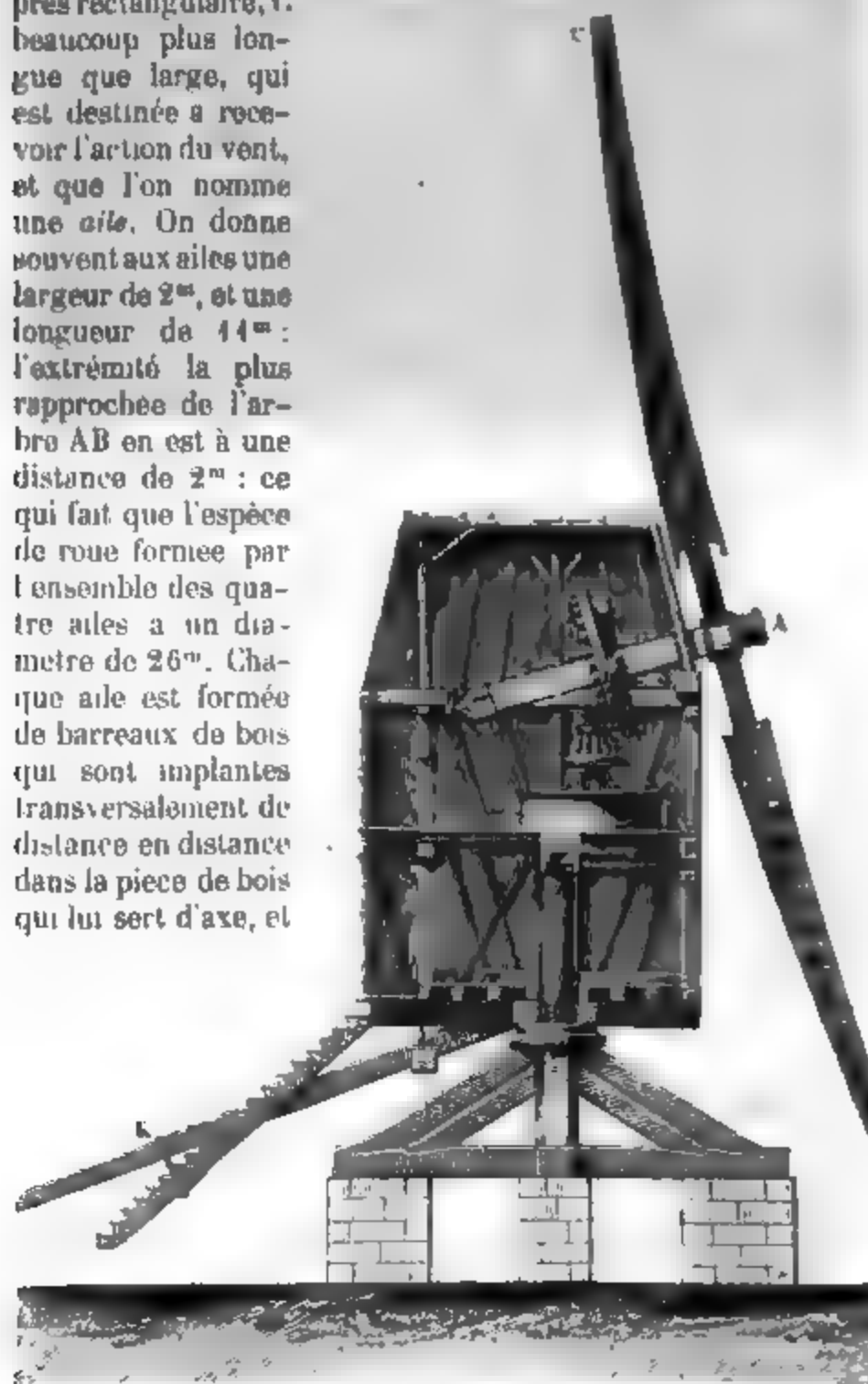


FIG. 476.

Les extrémités sont reliées par deux autres pièces de bois s'étendant parallèlement à l'axe, dans toute la longueur de l'aile. Le châssis ainsi construit a une grande analogie de forme avec une échelle à montants parallèles, qui serait fixée à l'axe de l'aile par les milieux de ses divers barreaux. Des toiles, ou voiles, s'étendent à volonté sur toute l'étendue de ce châssis, de manière à le transformer en une surface continue destinée à arrêter l'air dans son mouvement, et par conséquent à recevoir la pression qui doit en résulter.

Les surfaces des ailes ne sont pas dirigées dans le plan perpendiculaire à l'arbre AB qui contient leurs axes; elles présentent une certaine inclinaison sur ce plan, de manière à recevoir obliquement l'action du vent, dont la direction est la même que celle de l'arbre AB. Il est aisé de se rendre compte de la nécessité de cette obliquité des ailes sur la direction de l'arbre AB. Si une aile avait sa surface perpendiculaire à AB, elle recevrait l'action du vent en face, et en éprouverait une pression dirigée de la même manière que le vent, c'est-à-dire parallèlement à l'arbre AB: cette pression tendrait à repousser l'aile en arrière, à faire glisser l'arbre AB dans le sens de sa longueur; mais elle ne tendrait nullement à le faire tourner dans un sens plutôt que dans l'autre. Si la surface de l'aile était, au contraire, dirigée parallèlement à AB, le vent ne la rencontrerait que par sa tranche, et elle n'en éprouverait qu'une action extrêmement faible, qui d'ailleurs ne tendrait pas davantage à faire tourner l'arbre AB. Tandis que, si l'on donne à l'aile une certaine inclinaison sur l'arbre, la pression qu'elle éprouve de la part du vent, étant toujours perpendiculaire à sa surface, sera également oblique par rapport à l'arbre AB, et en conséquence cette pression tendra à le faire tourner dans un certain sens. Les inclinaisons des diverses ailes sont disposées de manière que les pressions supportées par chacune d'elles tendent toutes à faire tourner l'arbre AB dans un même sens.

L'obliquité de la surface des ailes sur la direction de l'arbre AB n'est pas ordinairement la même dans toute la longueur de chacune d'elles; cette obliquité va en diminuant depuis l'extrémité de l'aile située près de l'arbre, jusqu'à l'autre extrémité: en sorte que l'aile présente une surface qui n'est pas plane, mais qui est légèrement gauchie. Dans les moulins bien construits, la partie de l'aile qui est la plus rapprochée de l'arbre fait un angle de 60 degrés avec la direction de cet arbre, et la partie la plus éloignée fait avec cette direction un angle de 80 degrés. Ce changement d'obliquité, d'un point à un autre de l'aile, est motivé par la vitesse plus ou

moins grande avec laquelle ses divers points se meuvent en même temps. Il ne nous sera pas difficile de reconnaître qu'en effet cette différence de vitesse nécessite une différence d'inclinaison de la surface. Soit MN , fig. 475, la portion de surface de l'aile que



Fig. 475.

nous considérons. Admettons que le vent se meuve dans le sens de la flèche f , et que la surface MN , tournant autour de l'arbre du moulin, qui est dirigée suivant la même flèche f , se meuve au contraire suivant la direction perpendiculaire à la première indiquée par la flèche f' . Si, pendant que la surface MN passe dans la position $M'N'$, une molécule d'air située d'abord en N peut parcourir précisément le chemin NM , en vertu de sa vitesse propre, il est clair que cette molécule ne sera pas gênée par la surface MN , qu'elle ne fera que glisser le long de cette surface, et qu'en conséquence elle n'exercera sur elle aucune action. Pour que la surface MN puisse

recevoir une pression de la part du vent, il faut que la vitesse des molécules d'air soit capable de leur faire parcourir un chemin plus grand que NM' , pendant que la surface MN passe à la position $M'N'$, on voit en effet que, dans ce cas, cette surface gênera le mouvement de l'air, et que, par suite, l'air réagira en tendant à accroître la vitesse de la surface qu'il rencontre. Si nous attribuons successivement à MN des vitesses de plus en plus grandes, pour une même vitesse du vent, cette surface mettra un temps de plus en plus petit pour passer à la position $M'N'$; pendant ce temps les molécules d'air parcourront, en vertu de leur vitesse propre, des chemins de plus en plus petits. Donc, pour que ces chemins surpassent toujours NM' , et que par conséquent le vent exerce toujours une pression sur la surface MN , il faut que NM' soit de plus en plus petit, à mesure que MN marche plus vite, ou, en d'autres termes, il faut que MN s'approche de plus en plus d'être perpendiculaire à la direction du vent, ou bien à la direction de l'axe du moulin, qu'on suppose être la même. Or, les diverses parties d'une même aile, situées à des distances de plus en plus grandes de l'arbre tournant, sont précisément dans le cas que nous venons de supposer : elles marchent de plus en plus vite, et doivent cependant recevoir l'action d'une masse d'air qui a partout la même

vélocité : donc il faut que l'inclinaison de ces diverses parties sur la direction de l'arbre diminue en raison de l'augmentation de leur vitesse.

Le mouvement de rotation imprimé par le vent à l'arbre AB, *fig. 474*, se transmet au mécanisme intérieur du moulin, par l'intermédiaire d'une roue dentée D fixée à cet arbre, et d'une lanterne E avec laquelle engrène la roue D ; la lanterne est montée sur l'axe même de la meule courante F (§ 449). Toute la machine est portée par une forte pièce de bois verticale GH, autour de laquelle elle peut tourner comme sur un pivot. Un long levier K est fixé au moulin, et sert à l'orienter ; en appliquant une force de traction à l'extrémité de ce levier, on fait tourner tout le moulin autour de GH, et l'on amène ainsi l'arbre AB à être dirigé du côté d'où vient le vent. Pour faciliter cette manœuvre, on adapte souvent à l'extrémité du levier K, un petit treuil (§ 55) sur lequel s'enroule une corde, dont on fixe l'extrémité libre sur le sol, à une certaine distance. En faisant tourner le treuil, on tend à amener la corde pour l'enrouler sur son contour ; mais, comme son extrémité est fixe, et qu'elle ne peut pas céder à la force de traction qui lui est appliquée, c'est le treuil qui marche, en entraînant avec lui le levier K, et par suite le moulin.

L'appareil moteur d'un moulin à vent, composé de l'arbre AB, et des ailes C, C, est très souvent employé pour faire mouvoir d'autres mécanismes, tels que des scieries (§ 451), des vis hollandaises (§ 344), etc. On a conservé par extension le nom de *moulin à vent* à cet appareil en lui-même, quel que soit le genre de travail auquel il est employé.

§ 407. Lorsqu'un moulin à vent ne doit pas marcher, on serre les voiles, en les rapprochant de l'axe de chaque aile. De cette manière, les surfaces des ailes sont à jour, et ne donnent plus de prise au vent. Pour remettre la machine en mouvement, après avoir dirigé l'arbre moteur dans le sens du vent, il suffit d'écarter les voiles, afin de garnir de nouveau les ailes. Pour effectuer ces opérations, on amène successivement chaque aile au bas du chemin qu'elle parcourt en tournant, et on la maintient immobile dans cette position, pendant qu'on monte sur ses barreaux comme sur une échelle, soit pour tendre des voiles, soit pour les serrer. On parvient à maintenir les ailes dans l'immobilité, au moyen d'un frein analogue à celui que représente la figure 195 (page 185). Ce frein est formé d'un grand cercle de bois qui entoure la roue D, *fig. 474* ; une de ses extrémités est fixe ; l'autre extrémité est attachée à un fort levier, qui, par son seul poids, suffit pour serrer le cercle sur le contour de la roue, et

pour s'opposer à ce qu'elle prenne le moindre mouvement pendant

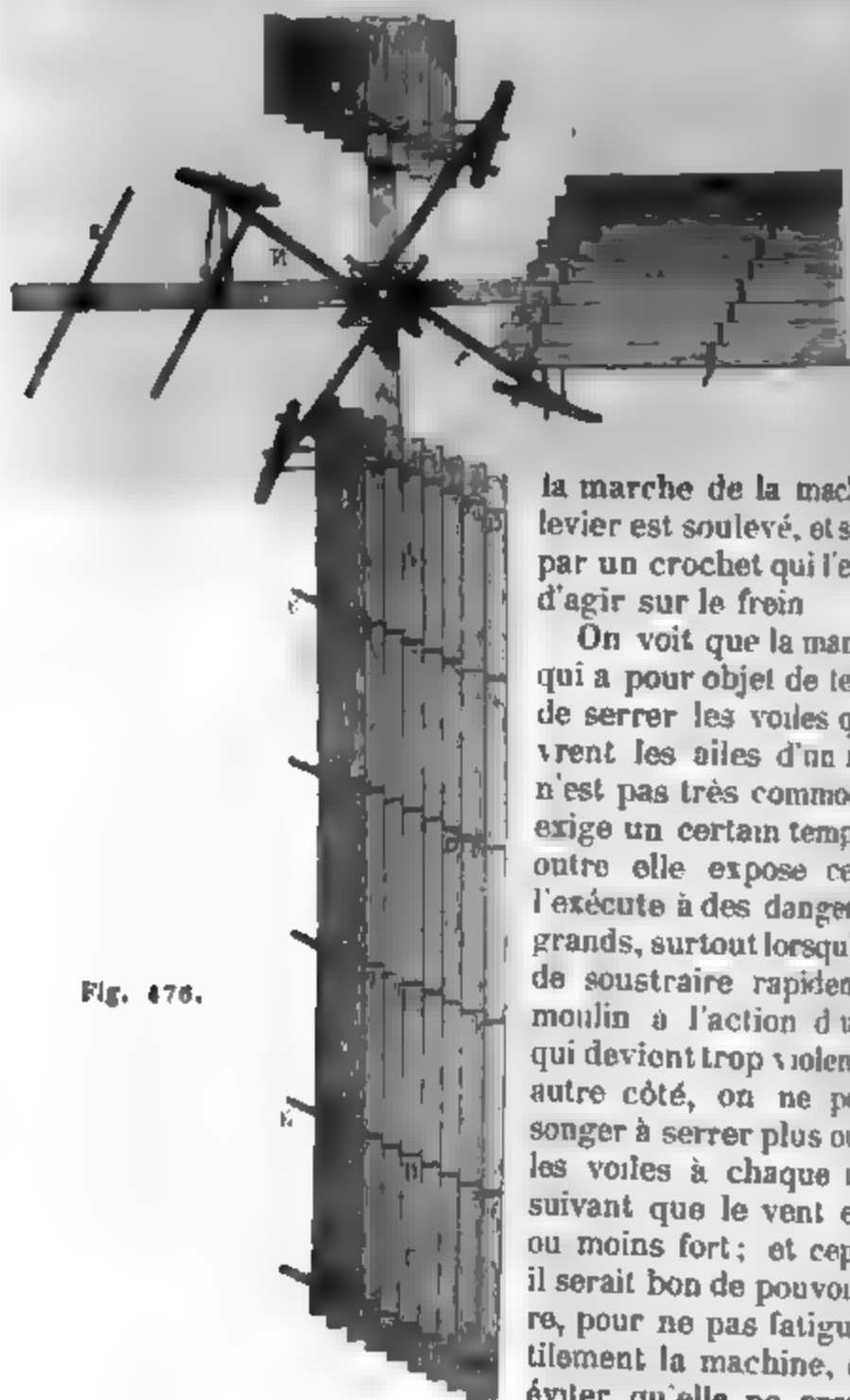


Fig. 476.

la marche de la machine ce levier est soulevé, et supporte par un crochet qui l'empêche d'agir sur le frein

On voit que la manœuvre qui a pour objet de tendre ou de serrer les voiles qui couvrent les ailes d'un moulin n'est pas très commode, elle exige un certain temps, et en outre elle expose celui qui l'exécute à des dangers assez grands, surtout lorsqu'il s'agit de soustraire rapidement le moulin à l'action d'un vent qui devient trop violent. D'un autre côté, on ne peut pas songer à serrer plus ou moins les voiles à chaque instant, suivant que le vent est plus ou moins fort ; et cependant il serait bon de pouvoir le faire, pour ne pas fatiguer inutilement la machine, et pour éviter qu'elle ne prenne un mouvement trop rapide.

C'est pour faire disparaître ces divers inconvénients, que M. Berton a imaginé récemment un système particulier d'ailes

sage se répand de plus en plus, et qui permet de faire volonté pendant la marche du moulin l'étendue des surfaces qui reçoivent l'action du vent. La fig. 476 représente la disposition qu'il a adoptée. L'arbre moteur du moulin est muni, comme les moulins ordinaires, de quatre bras A, qui lui sont perpendiculaires, et qui doivent former les axes des ailes. Mais ces ailes, au lieu d'être des surfaces à jour que l'on recouvre de toiles à volonté, sont formées d'un certain nombre de lattes C, qui se recouvrent par une partie, et qui déterminent ainsi une surface oblique à la verticale de l'arbre du moulin. Ces lattes, qui ont une grande analogie avec celles dont se composent les jalousies, sont attachées, au moyen de brides D, à des traverses E. Les traverses E sont elles-mêmes fixées en divers points des bras A, mais de manière à pouvoir tourner autour de leurs points d'attache, et faire des angles moins aigus avec la direction des bras A. Les brides D sont elles-mêmes mobiles autour de leurs points d'attache avec les traverses E. Quatre trinquets N sont liés à articulation avec leurs extrémités aux premières lattes de chaque aile; elles engrènent avec un même pignon denté, situé à l'autre extrémité de l'arbre du moulin. Ce pignon est fixé à un axe de fer qui traverse l'arbre dans toute sa longueur, et qui se termine à l'autre bout de l'arbre, par une manivelle à l'aide de laquelle on peut le faire tourner facilement dans l'ouverture circulaire qui le contient. En agissant sur la manivelle, on donne à l'axe qui lui est attaché au pignon fixé à l'autre extrémité de l'arbre, un mouvement de rotation dans un sens ou dans l'autre. Les crémaillères N ont ainsi tirées ou poussées d'une certaine quantité; cela fait varier en conséquence l'inclinaison des traverses E sur les bras A, et il en résulte que les lattes C recouvrent plus ou moins, ou en d'autres termes que les ailes présentent une largeur plus ou moins grande. En faisant tourner la manivelle d'une quantité suffisante, et dans le sens convenable, on parvient même à faire les lattes C à se superposer complètement; en sorte que

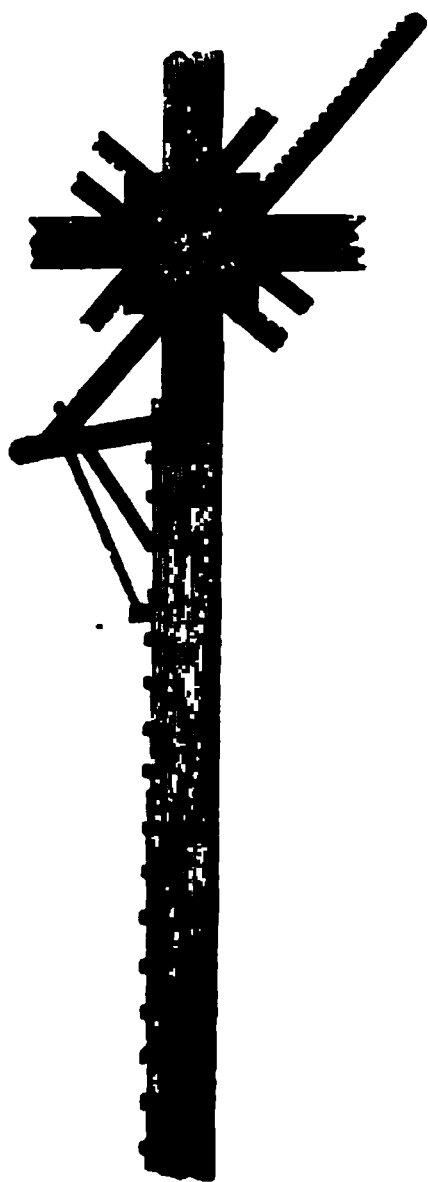


Fig. 477.

les ailes se présentent comme si elles étaient réduites à leurs bras, fig. 477.

On voit que l'élargissement ou le rétrécissement des ailes imaginées par M. Berton s'effectue avec la plus grande facilité de l'intérieur du moulin, et même pendant que la machine fonctionne. On peut donc sans peine, et aussi souvent qu'on le veut, mettre la largeur des ailes en rapport avec la vitesse du vent qui agit sur elles. Ce système d'ailes présente cependant un défaut, c'est que la surface de chaque aile est également inclinée sous la direction du vent dans toute sa longueur. D'après ce que nous avons dit, les parties extrêmes des ailes ne doivent recevoir que peu d'action de la part du vent, si toutefois elles en reçoivent. À égalité de surface, les ailes dont il s'agit doivent produire moins de travail que les ailes dont la surface est inégalement inclinée sur l'arbre en ses divers points.

On a reconnu que la marche d'un moulin à vent qui donne lieu à la production de la plus grande quantité de travail est celle pour laquelle le nombre de tours des ailes, en une minute, est double du nombre de mètres parcourus par le vent en une seconde.

EMPLOI DE LA VAPEUR COMME MOTEUR.

§ 408. Les machines à vapeur constituent un genre de moteurs dont l'usage encore récent est déjà extrêmement répandu, et tend à se répandre de plus en plus. C'est, sans contredit, de tous les moteurs connus, celui qui est le plus précieux pour l'industrie, en raison de la possibilité de l'employer partout, en lui donnant telle puissance qu'on veut, depuis la force d'un homme, jusqu'à la force de plusieurs centaines de chevaux-vapeur. Avant d'entrer dans la description des appareils à l'aide desquels on a pu utiliser la force de la vapeur d'eau, il est indispensable de rappeler les principales propriétés de cette vapeur, propriétés qui serviront de base à tout ce que nous aurons à dire des machines à vapeur.

§ 409. **Propriétés de la vapeur d'eau.** — Lorsqu'une certaine quantité d'eau est contenue dans un vase fermé, qu'elle ne remplit pas complètement, une portion de l'eau se réduit en vapeur, quelle que soit sa température. La vapeur ainsi formée se répand dans la partie de la capacité du vase qui n'est pas occupée par l'eau, soit que cette partie du vase ait été d'abord vide de toute matière, soit qu'elle contienne un gaz tel que de l'air atmosphérique. À mesure que la vapeur se forme, et s'accumule dans l'espace qui surmonte la masse d'eau, sa force élastique s'y accroît, mais celle

La force élastique ne peut pas dépasser une certaine limite, qui dépend uniquement de la température de l'eau. Dès que la vapeur a atteint cette limite, que l'on appelle sa *tension maximum*, il ne se produit plus de nouvelle vapeur; on dit alors que l'espace où elle se trouve est *saturé*. La présence d'une certaine quantité d'air dans l'espace où se répand la vapeur n'a aucune influence sur la tension maximum dont nous venons de parler; cet air n'influe que sur la rapidité avec laquelle la vapeur se forme. Si l'espace qui surmonte le liquide est vide de toute matière, le liquide se vaporise avec une rapidité extrême, et la vapeur acquiert presque instantanément sa tension maximum; si au contraire cet espace contient de l'air, la vapeur ne se forme que peu à peu, et se répand de même dans la vacuité qui lui est offerte, en s'infiltrant pour ainsi dire entre les molécules de l'air. Dans ce dernier cas, la force élastique de l'atmosphère gazeuse qui se trouve en contact avec l'eau est à chaque instant égale à la somme de la force élastique de l'air, et de celle de la vapeur d'eau que l'air renferme.

Si le vase qui contient de l'eau est ouvert, de manière à communiquer librement avec l'atmosphère, l'eau se vaporisera également; mais la vapeur formée, se répandant au dehors, ne pourra pas atteindre la tension maximum qui convient à la température de l'eau, et la vaporisation continuera indéfiniment, jusqu'à ce qu'il ne reste plus d'eau. La tension maximum de la vapeur est de plus en plus grande, à mesure que la température est plus élevée: la rapidité avec laquelle l'eau qui communique directement avec l'atmosphère se réduit en vapeur croît également avec la température. Lorsque la température est assez élevée pour que la tension maximum de la vapeur d'eau soit égale à la pression atmosphérique, la vaporisation de l'eau s'effectue rapidement. Dans ce cas, la vapeur n'a plus besoin de s'infiltrer peu à peu dans les interstices compris entre les molécules de l'air: elle a la force de vaincre la pression exercée par l'atmosphère sur la surface de l'eau, et de pousser l'air pour se faire un passage au dehors. Des bulles de vapeur se forment alors dans toute la masse liquide, et viennent se rompre tumultueusement à la surface, pour se répandre dans l'atmosphère: la masse d'eau est *en ébullition*. En général, l'eau se met en ébullition toutes les fois que la tension maximum de la vapeur, correspondant à sa température, n'est pas inférieure à la pression que le liquide éprouve sur sa surface, de la part de l'atmosphère qui la surmonte, de quelque nature que soit cette atmosphère, qu'elle soit formée de gaz, ou de vapeur, ou de l'un et de l'autre mélangés dans une proportion quelconque.

L'on continue à la comprimer, sa force élastique n'en elle restera égale à la tension maximum, et une vapeur se condensera en repassant à l'état liquide augmente l'espace dans lequel la vapeur peut se provenant de la condensation repassera à l'état de v tenant la force élastique égale à la tension maximum sera encore du liquide: mais, à partir du moment transformée tout entière en vapeur, une nouvelle l'espace qui lui est offert sera accompagnée d'une la force élastique de la vapeur, qui reprendra ainsi des gaz.

§ 414. Si une masse de vapeur est contenue dont les divers points ne sont pas à la même température élastique ne peut pas être supérieure à la tension correspond à la plus basse des températures des divers espace. On conçoit en effet que, s'il en était autrement élastique de la masse de vapeur devant être la même points, pour qu'il y ait équilibre, on aurait, au point où la température est la plus basse, une certaine quantité de vapeur qui surpasserait la plus grande tension que puisse exercer en ce point, ce qui est impossible. Si, par une circonstance, une masse de vapeur est mise en communication avec un espace dont la température correspond à la plus basse des températures des divers espace, la vapeur se condensera dans cet espace, et la tension élastique de la vapeur restera égale à la tension correspond à la plus basse des températures des divers espace.

reprises récemment par M. Regnault. Le tableau qui suit est extrait des résultats obtenus par ce dernier savant; il fait connaître la tension maximum de la vapeur d'eau, pour les températures de 10 en 10 degrés, depuis 0° jusqu'à 230°. Les tensions sont mesurées par les hauteurs des colonnes de mercure auxquelles elles sont en équilibre.

| TENSION
de la vapeur. | TEMPÉRATURE. | TENSION
de la vapeur. | TEMPÉRATURE. | TENSION
de la vapeur. |
|--------------------------|--------------|--------------------------|--------------|--------------------------|
| m | | m | | m |
| 0,0046 | 80° | 0,3546 | 160° | 4,6516 |
| 0,0092 | 90° | 0,5254 | 170° | 5,9617 |
| 0,0174 | 100° | 0,7600 | 180° | 7,5464 |
| 0,0315 | 110° | 1,0754 | 190° | 9,4427 |
| 0,0519 | 120° | 1,4913 | 200° | 11,6890 |
| 0,0920 | 130° | 2,0303 | 210° | 14,3248 |
| 0,1488 | 140° | 2,7176 | 220° | 17,3904 |
| 0,2334 | 150° | 3,5812 | 230° | 20,9264 |

On voit par ce tableau que la tension maximum de la vapeur d'eau augmente avec la température, et qu'elle croît avec une rapidité qui est de plus en plus, à mesure que la température s'élève. On remarque aussi que la tension maximum de la vapeur d'eau, à la température de 100 degrés, est mesurée par une colonne de mercure de 0^m,76, la même qui fait équilibre à la pression atmosphérique normale (§ 245); c'est ce qui doit avoir lieu, d'après ce que nous avons dit il n'y a qu'un instant, relativement à l'ébullition, la température de 100° est par définition celle de l'ébullition de l'eau, sous une pression mesurée par une colonne de mercure de 0^m,76 de hauteur.

La force élastique de la vapeur, dans les machines à vapeur, est habituellement indiquée en atmosphères (§ 245), il est important de connaître la température pour laquelle la tension maximum de la vapeur est égale à un nombre donné d'atmosphères. C'est à cet effet que nous donnerons encore le tableau suivant, qui est déduit des résultats obtenus par M. Regnault, et qui contient les températures correspondantes aux tensions de 1 à 28 atmosphères.

| TENSION
de la vapeur. | TEMPERATURE. | TENSION
de la vapeur. | TEMPERATURE. |
|--------------------------|--------------|--------------------------|--------------|
| mm | ° | mm | ° |
| 1 | 100,0 | 45 | 198,8 |
| 2 | 120,6 | 16 | 201,9 |
| 3 | 133,9 | 17 | 201,9 |
| 4 | 144,0 | 18 | 207,7 |
| 5 | 152,2 | 19 | 210,1 |
| 6 | 159,2 | 20 | 213,0 |
| 7 | 165,3 | 21 | 215,5 |
| 8 | 170,8 | 22 | 217,9 |
| 9 | 175,8 | 23 | 220,3 |
| 10 | 180,3 | 24 | 222,5 |
| 11 | 184,5 | 25 | 224,7 |
| 12 | 188,4 | 26 | 226,8 |
| 13 | 192,1 | 27 | 228,9 |
| 14 | 195,5 | 28 | 230,9 |

§ 443. Le passage de l'eau à l'état de vapeur exige une quantité de chaleur considérable, qui est employée uniquement à produire un changement d'état, sans que la température varie ; c'est ce que les physiciens nomment la *chaleur latente de vaporisation*. Lors ensuite la vapeur se condense, et revient à l'état liquide, elle dégage cette même quantité de chaleur, qui devient sensible par l'élévation de température des corps avec lesquels cette vapeur est en contact. Il résulte de là que plusieurs des phénomènes qui viennent d'être indiqués ne se passent pas aussi simplement qu'on pour le croire au premier abord, par le motif que la vaporisation de l'eau et la condensation de la vapeur sont toujours accompagnées d'une tendance à un changement considérable de température.

Une masse d'eau qui se vaporise plus ou moins rapidement, et qui n'est pas en communication avec une source de chaleur, éprouve nécessairement un abaissement de température. La tension maximum de la vapeur qui se forme au-dessus du liquide n'est donc celle qui correspond à la température qu'il avait tout d'abord ; elle est plus faible, en raison du refroidissement que le liquide éprouve à mesure que la vaporisation s'effectue. Une certaine quantité d'eau ayant une température de 100 degrés, se mettra en ébullition et communiquera librement avec l'atmosphère ; mais l'ébullition ce

immédiat, parce que la température du liquide s'abaissera rapidement au-dessous de 100 degrés, par suite de la formation de la vapeur. Aussi, pour entretenir l'ébullition, est-il nécessaire de fournir instantanément de la chaleur à la masse d'eau ; et la quantité de vapeur qui se forme dans un temps donné est plus ou moins considérable, suivant que la chaleur que l'on restitue à l'eau dans le même temps est elle-même plus ou moins grande.

On conçoit d'après cela qu'il est très important de connaître la quantité de chaleur que nécessite la vaporisation d'une masse d'eau déterminée, et cela pour les diverses températures auxquelles on peut vouloir effectuer cette vaporisation. C'est pour cela que nous donnons encore le tableau suivant, déduit, comme les deux autres, des recherches faites par M. Regnault sur les propriétés de la vapeur d'eau.

| TEMPÉRATURE
de la vapeur
saturée. | CHALEUR
latente. | CHALEUR
totale. | TEMPÉRATURE
de la vapeur
saturée. | CHALEUR
latente. | CHALEUR
totale. |
|---|---------------------|--------------------|---|---------------------|--------------------|
| 0° | 606,5 | 606,5 | 120° | 522,3 | 643,1 |
| 20° | 592,6 | 612,6 | 140° | 508,0 | 649,2 |
| 40° | 578,7 | 618,7 | 160° | 493,6 | 655,3 |
| 60° | 564,7 | 624,8 | 180° | 479,0 | 661,4 |
| 80° | 550,6 | 630,9 | 200° | 464,3 | 667,5 |
| 100° | 536,5 | 637,0 | 220° | 449,4 | 673,6 |

La deuxième colonne de ce tableau fait connaître la quantité de chaleur nécessaire pour faire passer un kilogramme d'eau de l'état liquide à l'état de vapeur à saturation, sans qu'il y ait de changement dans la température, qui, après la vaporisation comme avant, est celle indiquée par la première colonne. La troisième colonne donne la quantité de chaleur nécessaire pour transformer un kilogramme d'eau, prise à la température de 0°, en vapeur saturée à la température indiquée par le nombre correspondant de la première colonne. L'unité de chaleur est, comme on sait, la quantité de chaleur nécessaire pour élever la température d'un kilogramme d'eau 0° à 1°.

§ 414. — Historique de l'invention des machines à vapeur.

L'invention des machines à vapeur étant une des plus importantes qui aient été faites dans les temps modernes, on a cherché naturellement à qui on devait en attribuer l'honneur. Nous allons indiquer brièvement les principaux résultats de ces recherches historiques,

en prenant pour guide l'intéressante notice que M. Arago a publiée à ce sujet dans l'*Annuaire du bureau des longitudes*.

L'*œolipyle*, inventé par Héron d'Alexandrie, paraît être le premier exemple de l'emploi de la vapeur comme force motrice. Pour s'en faire une idée, il suffit de se reporter à l'appareil à réaction représenté par la fig. 447 page 553. Dans cet appareil, l'écoulement de l'eau par des tuyaux convenablement recourbés détermine un mouvement de rotation du vase qui renferme le liquide. Si ce vase contenait de la vapeur au lieu d'eau, et que la force élastique de cette vapeur fût capable de la faire sortir avec une certaine vitesse par les tuyaux recourbés, il se produirait également un mouvement de rotation : tel est le principe de l'*œolipyle*. La disposition indiquée par Héron est un peu différente. Son appareil consiste en une boule métallique creuse, pouvant tourner autour d'un diamètre horizontal, et munie de deux tuyaux recourbés qui partent des extrémités d'un autre diamètre perpendiculaire au premier. Quoi qu'il en soit, la machine de Héron n'a rien de commun avec nos machines à vapeur, et ne peut pas même en être considérée comme une première ébauche ; le mode d'action de la vapeur y est essentiellement différent.

Salomon de Caus, Français de naissance, est le premier qui ait

indiqué (en 1645) la vapeur d'eau comme pouvant agir par pression pour produire l'élévation de l'eau. L'appareil qu'il décrit se compose d'un ballon de cuivre A, fig. 478, muni des deux tubes B, C, dont le premier B sert à l'introduction de l'eau, et le second C sert à la sortie du liquide sous l'action de la vapeur. Le tube B se termine par un entonnoir D, et est garni d'un robinet E. Lorsqu'on a versé de l'eau dans le ballon jusqu'au niveau F, on ferme le robinet E, et l'on place l'appareil sur un foyer. La vapeur qui se forme ne peut pas sortir par le tuyau B, qui est fermé ; elle ne peut pas s'échapper non plus par le tuyau C, qui plonge dans l'eau, au-dessous du niveau F : elle acquiert donc, dans le haut



Fig. 178.

du ballon, une tension de plus en plus grande, qui oblige l'eau à monter dans le tuyau C, et à sortir sous forme de jet.

talien Branca a décrit (en 1629) une machine qui a beaucoup d'analogie avec l'éolipyle de Héron, quant au mode d'action de la vapeur. Un ballon A, *fig. 479*, dans lequel on introduit de l'eau, est placé sur un ré-

servoir B; la vapeur se s'échappe par un tuyau C, et vient frapper les rayons d'une roue

MINIATURE

rotation de la machine produit par la

pression de la va-

peur peut être

appliqué à la pro-

duction d'un tra-

vail, par l'inter-

médiaire d'une

manivelle E, fixée

à une des extré-

mités de son axe.

La machine de

Branca ne peut,

comme que l'éo-

lipyle de Héron,

être gardée com-

me l'origine des

machines à

vapeur.

Angleterre,

Thomas Savery

présenta à pu-

blier (1663) un

dessin dans le-

quel il parle d'un

appareil qu'il a in-

venté pour élever

l'eau à l'aide du

feu. On se contente d'en donner une idée succincte, sans figure.

La machine qui se trouve ici, *fig. 480*, a été disposée d'après la courte

description qu'on lit dans son ouvrage. Deux chaudières sphériques

sont placées à côté l'une de l'autre dans un fourneau; deux

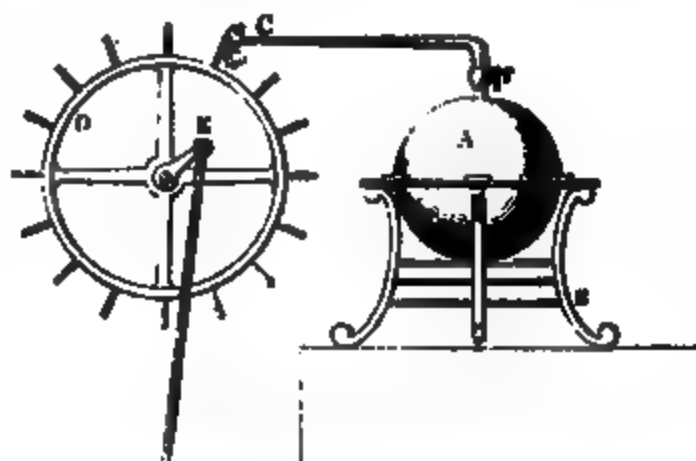


Fig. 479.

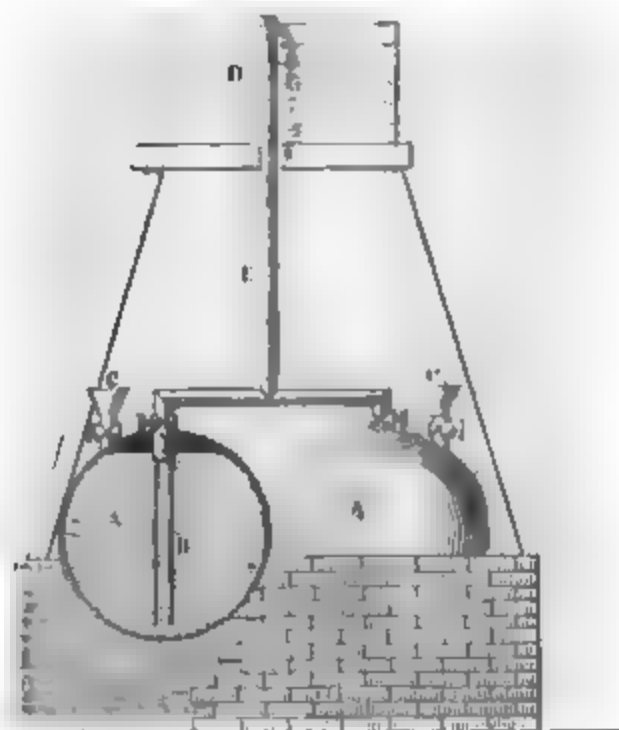


Fig. 480.

tuyaux B descendent dans chacune de ces chaudières, jusqu'au fond, et sont destinées à l'ascension de l'eau qui y est contenue. deux entonnoirs C, munis de robinets, servent à l'introduction de l'eau dans chaque chaudière, un réservoir supérieur D est destiné à recevoir l'eau élevée par le tuyau E, auquel aboutissent les deux tuyaux B qui viennent des chaudières. Si l'on remplit d'eau l'une des chaudières, puis qu'on fasse du feu dessous, après avoir fermé le robinet de l'entonnoir C, et ouvert celui qui est au haut du tuyau B, l'eau sera poussée par la vapeur dans le tuyau E, et s'élèvera dans le réservoir D. Les deux chaudières doivent fonctionner alternativement. Cette machine est évidemment la même que celle de Salomon de Caus, avec un perfectionnement qui consiste dans l'emploi de deux chaudières au lieu d'une seule, et qui a pour but d'éviter les pertes de temps occasionnées par le remplissage des chaudières et l'échauffement de l'eau qu'on y a introduite.

§ 413 Dans les machines de Salomon de Caus et du marquis de Worcester, une partie de l'eau introduite dans les chaudières se réduisant en vapeur, et cette vapeur agissait par pression sur la surface du reste de l'eau, pour la refouler dans un tuyau d'ascension. Denis Papin, né à Blois, est le premier qui ait eu l'idée de faire agir la vapeur sur un piston destiné à recevoir sa pression,



Fig. 481.

pour l'employer à vaincre une résistance. Voici en quoi consiste la machine proposée par Papin en 1690. Un cylindre A, fig. 481, fermé par le bas, et ouvert par le haut, contient un piston B qui peut se mouvoir dans toute sa hauteur. On n'introduit le piston dans le cylindre qu'après y avoir versé préalablement une petite quantité d'eau. Une ouverture I, pratiquée dans le piston, permet de l'abaisser jusqu'à ce que sa face inférieure touche l'eau contenue dans le cylindre, en laissant échapper l'air qui se trouve au-dessous de lui. Cela étant fait, on ferme l'ouverture C au moyen d'une tige M, et l'on fait du feu sous le fond du cylindre A. L'eau, s'échauffant de plus en plus, arrive bientôt à une température pour laquelle

la tension maximum de la vapeur est capable de surmonter la pression atmosphérique (§ 409); alors le piston B, étant plus fortement pressé sur sa face inférieure que sur sa face supérieure, doit monter par

qu'au haut du cylindre. Si l'on arrête le piston dans cette nouvelle position, au moyen d'un cliquet E que l'on introduit dans une échancrure de la tige H, puis que l'on enlève le feu, le cylindre se refroidit la vapeur qu'il contient se condense, et le piston n'est presque plus soumis qu'à la pression atmosphérique, dont une faible portion seulement est équilibrée par la vapeur qui reste encore. Il suffit alors de retirer le cliquet E, pour que le piston descende sous l'action de cette pression ; et si l'on suspendait un poids à la corde L, qui passe sur les poulies T, et qui vient s'attacher à la tige H du piston, ce poids pourrait être élevé par le mouvement ainsi produit. On pourrait d'ailleurs recommencer la même opération, autant de fois qu'on voudrait, avec la même quantité d'eau.

Cette machine a été essayée en petit par Papin. On y voit le principe de la machine atmosphérique, dont nous parlerons bientôt.

§ 416. Le capitaine Savery (en 1689) est l'auteur de la première machine qui ait été appliquée en grand pour l'élévation de l'eau. Cette machine a beaucoup d'analogie avec celles que Salomon de Caus et le marquis de Worcester avaient indiquées précédemment, mais elle en diffère en ce que la vapeur n'est pas formée par une portion de l'eau à élever, mais par une masse d'eau séparée qui est seule soumise à l'action d'un foyer. Un fourneau A, fig. 482, con-

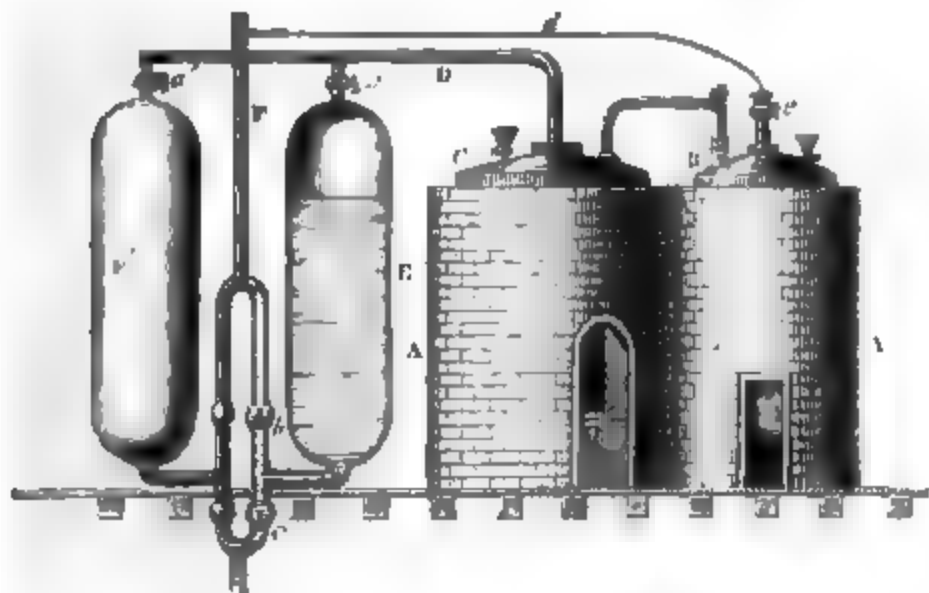


Fig. 482.

tient deux chaudières fermées B, C, qui communiquent l'une à l'autre. La vapeur qui se forme dans ces chaudières se rend dans le tuyau D, et peut passer de là dans l'un ou l'autre des récipients E, F.

suivant qu'on ouvre le robinet *a*, ou le robinet *a'*. Ces récipients étant pleins d'eau, on conçoit que, au moment où l'on ouvre le robinet *a*, la vapeur presse l'eau contenue en *E*, et la fait monter par le tuyau d'ascension *F*, en ouvrant la soupape *b*. Lorsque le récipient *E* est vide, on ferme le robinet *a*, et l'on ouvre le robinet *a'* : c'est alors l'eau du récipient *E'* qui est refoulée dans le tuyau d'ascension *F*. Pendant ce temps, le récipient *E* se refroidissant la vapeur qu'il contient se condense, et le vide ainsi formé détermine l'élévation de l'eau du réservoir inférieur, qui ouvre la soupape *c*, et vient remplir de nouveau le récipient *E*. On voit donc qu'il suffit d'ouvrir et de fermer alternativement les robinets *a*, *a'*, pour que la machine fonctionne. Un tuyau *d*, qui s'embranché en un point du tuyau d'ascension *F*, vient aboutir à l'une des chaudières, et est habituellement fermé par un robinet *e* : ce tuyau sert à remplir les chaudières d'eau, lorsqu'elles se sont vidées par la production de la vapeur.

Dans cette machine de Savery, l'eau qu'il s'agit d'élever n'est pas contenue dans les chaudières, comme cela avait lieu dans celles de Salomon de Caus et de Worrester, mais elle ne s'en échauffe pas moins. Aussitôt que la vapeur est mise en communication avec l'un des récipients *E*, *E'*, elle se condense au contact de cette eau qui est froide : de nouvelles quantités de vapeur, arrivant constamment des chaudières, se condensent de même en réchauffant l'eau du récipient ; et ce n'est que lorsque cette eau est suffisamment chaude pour permettre à la vapeur de conserver la force élastique nécessaire à l'élévation de l'eau dans toute la hauteur du tuyau d'ascension *F*, que cette élévation commence, et que le récipient se vide.

Pour faire disparaître ce défaut grave de la machine de Savery, Papin imagina, en 1707, de ne faire agir la vapeur par pression sur l'eau à élever que par l'intermédiaire d'un piston flottant sur cette eau, ainsi qu'on le voit sur la *fig. 483*. Une chaudière sphérique communique, par un tuyau *L*, avec un cylindre *I* qui doit alternativement se remplir et se vider d'eau. Un robinet *C* permet d'établir et d'intercepter à volonté cette communication. Le piston *H* contient des parties creuses *N* qui lui permettent de flotter sur l'eau, ce piston reçoit la pression de la vapeur sur sa face supérieure, et la transmet au liquide. Les soupapes *B*, *E*, servent, l'une à l'entrée de l'eau dans le cylindre *I*, l'autre à sa sortie de ce cylindre. On voit, au sommet de la chaudière, une soupape sur laquelle s'appuie un levier *D*, chargé d'un poids *F* à son extrémité libre : c'est la *soupape de sûreté*, dont Papin est l'inventeur, et qui a pour objet de s'opposer à ce que la vapeur ne prenne une trop forte tension dans la

chaudière; on en voit encore une autre G au haut du cylindre I. Nous avons déjà vu une soupape de ce genre dans la presse hydrau-

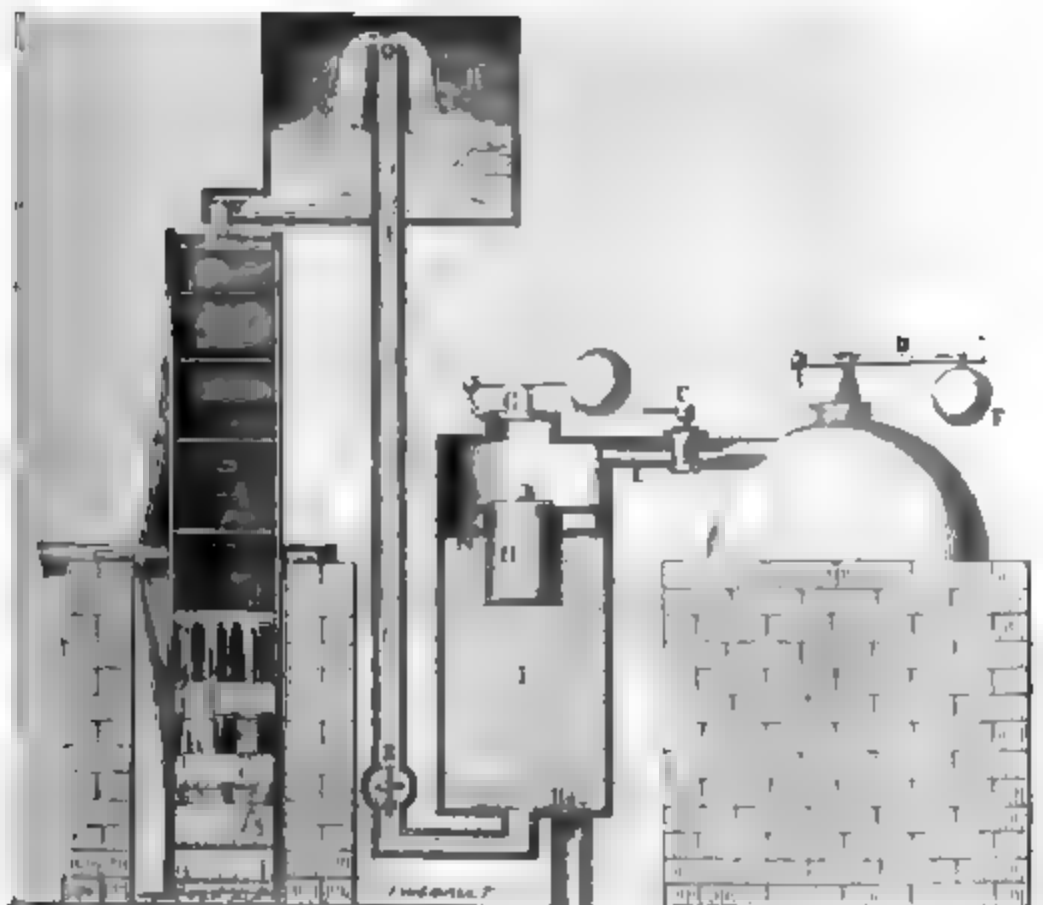


Fig. 483.

lique (§ 371); mais ce n'est qu'une imitation de la soupape de sûreté des chaudières à vapeur, qui était employée depuis longtemps, lorsque la première presse hydraulique a été construite.

Papin ne s'est pas contenté d'ajouter un piston flottant à la machine de Savery : il a voulu que sa machine, au lieu de servir uniquement à élever de l'eau, pût devenir un moteur capable de faire mouvoir tels mécanismes qu'on voudrait. Pour cela il faisait déboucher son tuyau d'ascension, en Q, dans une caisse R, fermée de toutes parts, excepté en W, où se trouvait une ouverture permettant au liquide de s'écouler pour tomber sur une roue hydraulique. L'eau sortait de la caisse R avec une vitesse qui était beaucoup augmentée par la compression de l'air situé au-dessus d'elle, et faisait ainsi tourner la roue, en agissant à la fois par sa vitesse et par son poids.

Savery avait annoncé sa machine comme pouvant servir à l'ascension des eaux des mines; mais elle ne pouvait pas élever l'eau à une hauteur un peu grande, sans qu'il en résultât des inconvénients de plus d'un genre, par suite de la forte tension que doit prendre la vapeur. Les fuites de la vapeur à travers les joints de la machine, et les explosions des chaudières, étaient difficiles à éviter à cette époque. Aussi cette machine fut-elle peu employée. De plus la modification que Papin proposa d'y apporter ne fut adoptée.

§ 417. La première machine à vapeur qui ait rendu de véritables services à l'industrie, est celle de Newcomen, qui est habituellement désignée sous le nom de *machine atmosphérique*. Cette

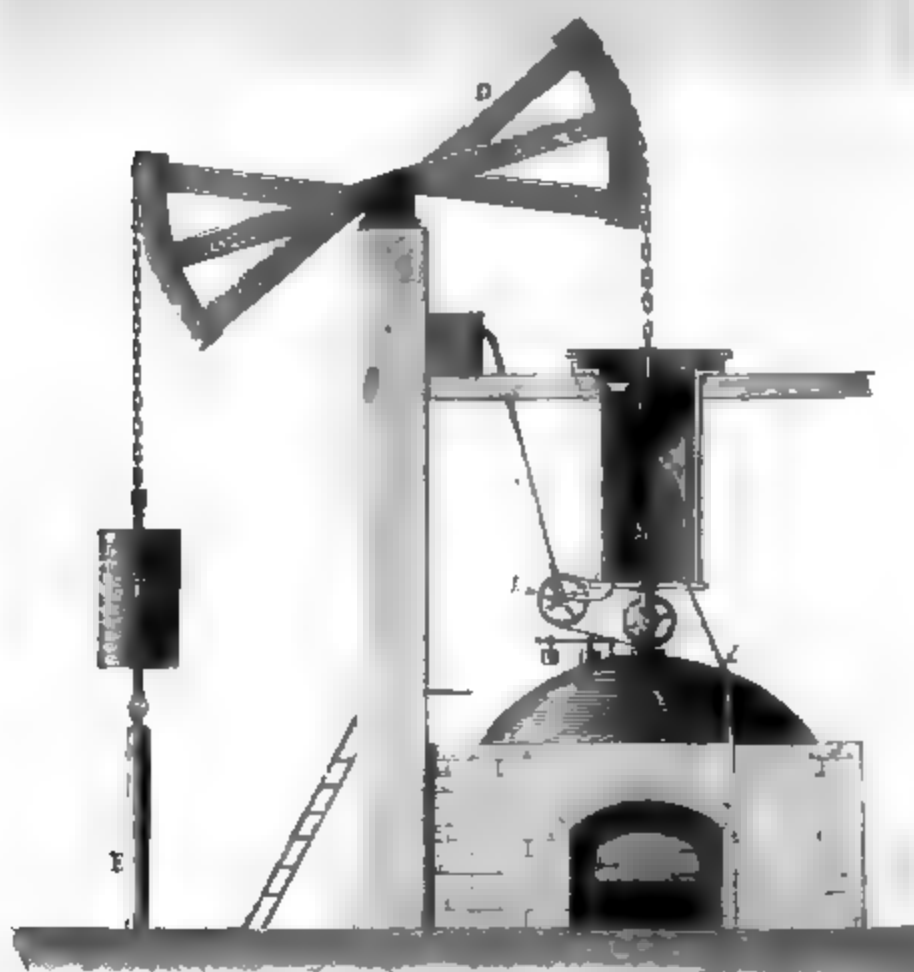


Fig. 484.

machine date de 1705. Elle n'est à proprement parler que la réalisation de l'idée émise par Papin en 1690 (§ 415).

La fig 484 fait connaître la disposition de cette machine.

employée à l'épuisement des eaux des mines, et qui l'est même dans certaines localités. Une chaudière A est destinée à la production de la vapeur; elle a la forme d'un hémisphère terminé heureusement par un fond plat, et est munie d'une soupape de sûreté. La vapeur formée dans la chaudière peut se rendre dans le cylindre B par un tuyau qui les réunit. Un robinet, dont la tête est fermée d'une espèce de roue *a*, est adapté à ce tuyau, et permet d'ouvrir et d'intercepter alternativement la communication de la chaudière avec le cylindre. Le piston C, mobile dans le cylindre B, est attaché par une chaîne à l'une des extrémités d'un balancier D, qui peut tourner autour de son milieu. L'autre extrémité de ce balancier supporte, au moyen d'une chaîne, une longue tige E, qui descend dans un puits de mine, et qui est destinée à y faire mouvoir des pompes : c'est la maîtresse tige dont nous avons parlé à l'occasion des pompes de mines (§ 364).

Lorsque le robinet *a* est ouvert, la vapeur presse le piston C de bas en haut, et fait équilibre à la pression atmosphérique qui agit sur sa face supérieure; la tige E peut alors descendre, en vertu de son poids et du poids additionnel F, en faisant remonter le piston C jusqu'au haut du cylindre B. Si l'on vient alors à fermer le robinet *a*, et à déterminer par un moyen quelconque la condensation de la vapeur contenue en B, la pression atmosphérique, qui agit sur la face supérieure du piston C, n'est plus contre-balancée par la tension de la vapeur; le piston redescend alors, et soulève la tige E. Cette seconde partie du mouvement du piston C donne lieu à la production d'une quantité de travail aussi grande qu'on veut; il suffit pour cela que la surface de ce piston ait des dimensions convenables.

Pour opérer la condensation de la vapeur dans le cylindre B, on avait d'abord un moyen dont s'était déjà servi Savery, et qui consistait à faire tomber de l'eau froide sur la surface extérieure du cylindre. Mais ce moyen n'agissait que lentement. Un jour on apprit que la condensation se produisait avec une rapidité beaucoup plus grande qu'à l'ordinaire. En cherchant à se rendre compte de ce fait, on reconnut qu'il était dû à la présence de l'eau qu'on versait sur le piston, pour s'opposer au passage de l'air ou de la vapeur entre son contour et les parois du cylindre. Une partie de l'eau passait par un petit trou dont le piston était accidentellement percé, et tombait par gouttelettes dans l'espace rempli de vapeur; de là la condensation rapide qu'on observait. On mit à profit ce résultat important, et, à partir de ce moment, on n'opéra plus la condensation qu'au moyen d'une injection d'eau froide faite à l'in-

terieur de la capacité contenant la vapeur à condenser. A cet effet un tuyau *c*, amenant l'eau froide d'un réservoir *G* débouche au fond du cylindre. Un robinet muni d'une roue *a'* est adapté au tuyau, et permet de produire et d'interrompre à volonté l'injection d'eau froide. Une chaîne sans fin embrasse les deux roues *a*, *a'*, et fait qu'elles ne peuvent pas tourner l'une sans l'autre. Une manivelle *b*, liée à la roue *a'*, permet de faire tourner ces deux roues en même temps. Dans la position actuelle, le robinet *a* est fermé le robinet *a'* est ouvert, et l'eau froide du réservoir *G* peut se rendre dans le cylindre *B*, pour y produire la condensation de la vapeur. Lorsque le piston *C* est arrivé au bas de sa course, il suffit de tourner la manivelle *b* en l'abaissant, pour fermer le robinet *a'* et ouvrir le robinet *a*. Alors le piston *C* remonte : on ramène la manivelle dans sa première position, le piston *C* redescend, et ainsi de suite. Une ouverture pratiquée au bas du cylindre *B* communique avec un tuyau *d* destiné à évacuer l'eau qui s'accumule constamment au fond du cylindre ; de temps en temps on fait sortir cette eau, en ouvrant un robinet adapté au tuyau *d*.

§ 418. Dans la machine atmosphérique, la vapeur n'a pas d'autre objet que de faire équilibre à la pression atmosphérique ; aussi sa tension ne doit-elle pas dépasser une atmosphère. Mais en employant la vapeur de cette manière, il faut absolument opérer sa condensation, ce qui exige qu'on ait à sa disposition une assez grande quantité d'eau. Si, au lieu de cela, on fait agir la vapeur sur un piston, en lui donnant une force élastique supérieure à celle de l'air atmosphérique, on pourra obtenir un effet analogue à celui que fournit la condensation, c'est-à-dire diminuer la tension de la vapeur, en la faisant communiquer librement avec l'atmosphère. Tel est le principe des machines dites à haute pression, sans condensation.

Papin est le premier qui ait construit une machine de ce genre. Leupold, qui l'a fait connaître en 1724, en a décrit une du même genre qui est représentée ici, *fig.* 485. Une chaudière *A*, destinée à la production de la vapeur, est surmontée de deux cylindres *R*, *S*, avec lesquels elle communique alternativement. Un robinet *B*, placé sur le passage de la vapeur, permet de la conduire, tantôt dans le cylindre *R*, tantôt dans le cylindre *S* ; ce robinet fait en même temps communiquer avec l'atmosphère, par le conduit *M*, celui des deux cylindres qui ne reçoit pas de vapeur de la chaudière. Dans la position qu'indique la figure, la vapeur de la chaudière va en *R*, et celle qui était en *S* a pu s'échapper dans l'atmosphère ; en faisant tourner le robinet *B* d'un angle droit, on fera passer la vapeur de la chaudière en *S*, et celle qui s'est rendue en *R* pourra se répandre

de l'atmosphère. Les pistons C, D, sont reliés par les tiges E, F, aux balanciers G, H ; ces balanciers sont articulés d'une autre part aux tiges K, L, de deux pompes foulantes O, P, qui puisent

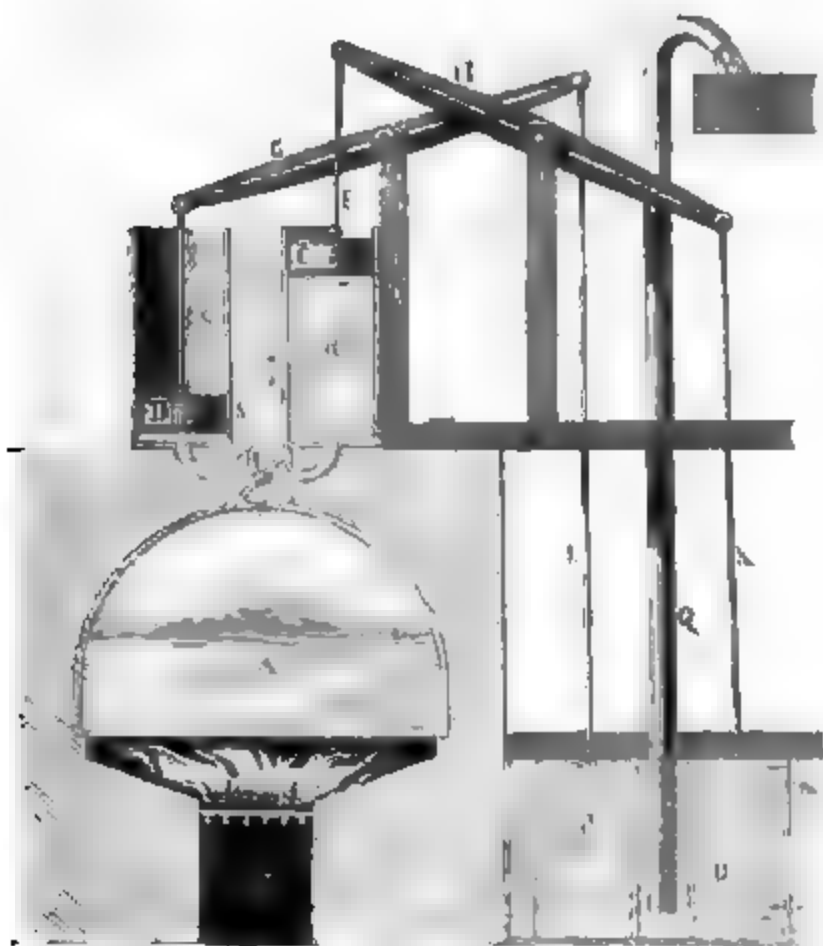


Fig. 485.

l'eau dans un réservoir N, et l'élèvent par un tuyau Q jusque dans un second réservoir T. Chacun des pistons C, D, est poussé du bas vers le haut du cylindre qui le contient, lorsqu'il est soumis à l'action de la vapeur de la chaudière ; et en même temps il abaisse le piston de la pompe correspondante, en foulant de l'eau dans le tuyau Q. Lorsque ensuite la vapeur qui est au-dessous de ce piston peut échapper par l'ouverture M, il est également pressé sur ses deux faces, et redescend en vertu de son poids, qui l'emporte sur les résistances à vaincre.

§ 419. *Machine à vapeur de Watt à simple effet.* — Ce mécanisme, que nous avons dit dans les paragraphes précédents peut donner une idée de la marche progressive qu'a suivie l'emploi de la vapeur



même temps que nous donnerons la description simple et à double effet, telles qu'il les a disposées.

La machine à vapeur de Watt à simple effet pour remplacer la machine atmosphérique de Newcomen. Elle se compose principalement, comme la machine atmosphérique, d'un cylindre dans lequel un piston se meut et va en haut et de haut en bas. La tige de ce piston est reliée à l'une des extrémités d'un balancier, qui a un mouvement de va-et-vient à une tige de pompe à l'autre extrémité. Dans la machine de Watt, comme dans la machine atmosphérique, le piston doit monter dans le cylindre par l'action du poids de la tige de pompe, action qui lui est transmise par l'autre extrémité du balancier; et le mouvement descendant doit être produit par la différence des pressions sur sa face supérieure et sur sa face inférieure. Dans la machine atmosphérique, la pression sur les deux faces du piston, pendant son mouvement ascendant, et la différence de pression sur ces deux faces pendant son mouvement descendant, ne sont pas obtenues de la même manière dans les deux machines.

Le piston A, de la machine de Watt, fig. 486, est dans un cylindre BB qui est fermé à ses deux extrémités C, D, existent au haut et au bas de ce cylindre, et qui sont reliées à une tige de pompe à l'autre extrémité.

des moments convenables. Les soupapes G et K étant a soupape H formée, la vapeur qui vient de la chau-

id libremont
du cylindro,
re C, et peut
sa pression
upérieure du
même temps
i s'était pré-
roduite sous
rouve en com-
directe avec
r, par la sou-
par suite ello
r qu'une tres
i § 444). Le
se descendre,
la différence
exercées sur
es est capa-
re les résis-
sont appli-
ement où le
ve au bas du
ème les sou-
l'on ouvre la
alors le haut
ylindre com-

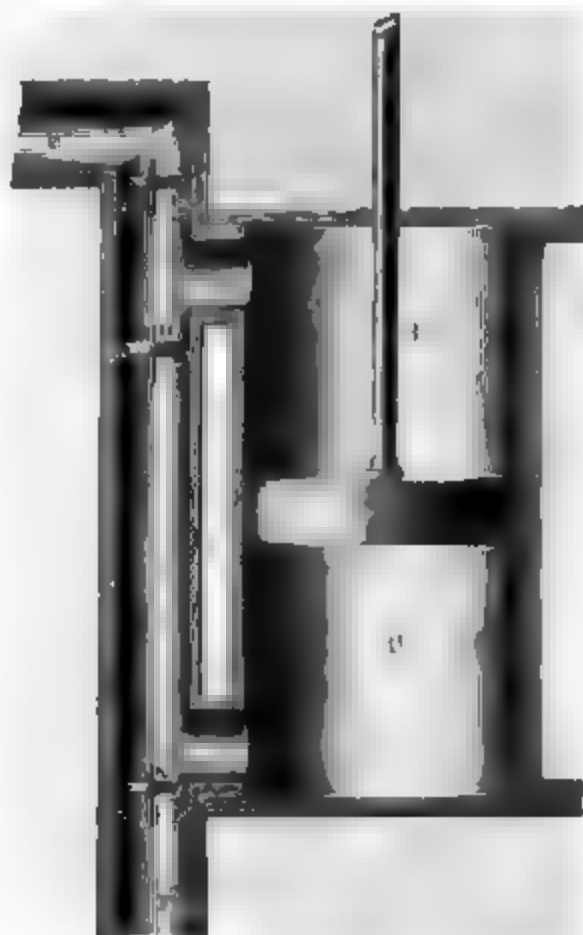


Fig. 486.

un avec l'autre; tandis que leur communication est soit avec la chaudière, soit avec le condenseur. Le ve donc également pressé sur ses deux faces, et il difficulté, sous l'action de la tige de pompe qui est autre extrémité du balancier. Le piston A étant ar- e sa course, il suffit de fermer la soupape H, et d'ou- autres, pour que le mouvement descendant du piston

Les trois soupapes G, H, K, sont habituellement s des noms spéciaux, qui rappellent l'objet de chacune il est bon de connaître : G est la *soupape d'admis-* i *soupape d'équilibre*; K est la *soupape d'exhaustion*. e soupape, qui laisse pénétrer un jet d'eau froide dans , s'ouvre et se ferme en même temps que la soupape

§ 120. L'emploi d'un condenseur, c'est-à-dire d'une capacité séparée dans laquelle doit s'opérer la condensation de la vapeur par une injection d'eau froide, constitue la plus importante des inventions de Watt. Pour se convaincre de son importance, il suffit d'examiner ce qui se passe dans la machine de Newcomen. Au moment où le piston est arrivé en haut de sa course, on détermine une injection d'eau froide dans le cylindre, pour y condenser la vapeur, et faire redescendre le piston. Mais cette eau froide abaisse en même temps la température des parois du cylindre, et elle l'abaisse d'une quantité considérable. Lorsque ensuite on veut faire remonter le piston, on fait arriver de nouvelle vapeur de la chaudière dans le cylindre. Cette vapeur, se trouvant en contact avec des parois refroidies, se condense aussitôt, et ce n'est que lorsque la température de ces parois s'est suffisamment élevée par cette condensation, que la vapeur conserve dans le cylindre une force élastique assez grande pour faire équilibre à la pression atmosphérique, et pour permettre au piston de remonter. On voit par là que le refroidissement des parois du cylindre, à chaque coup de piston, représente en pure perte une grande quantité de vapeur, et l'on comprend toute l'importance qu'il y avait, sous le rapport de l'économie du combustible consommé, à faire disparaître ce grave défaut de la machine de Newcomen. Watt y est parvenu de la manière la plus heureuse, par l'emploi d'un condenseur séparé.

L'emploi de la vapeur, pour presser la face supérieure du piston au lieu de l'air atmosphérique, permet d'exercer une plus forte pression sur un même piston. Il suffit pour cela de faire en sorte que la vapeur formée dans la chaudière prenne une force élastique supérieure à celle de l'air atmosphérique. Il en résulte que, pour construire une machine d'une puissance déterminée, il n'est pas nécessaire de donner au cylindre des dimensions aussi grandes que celles qu'on devrait lui donner, si l'on adoptait la disposition des machines de Newcomen.

Les machines de Watt à simple effet sont encore employées dans quelques localités. On en voit à Paris, dans les établissements publics connus sous les noms de *pompe à feu du Gros-Caillois*, et *pompe à feu de Chaillot*; elles servent à élever les eaux de la Seine pour le service de la ville. Cependant nous nous contenterons d'en avoir indiqué le principe, sans entrer dans le détail de leur disposition. Nous décrirons de préférence une des machines à simple effet que l'on construit maintenant, surtout dans le comté de Cornwall (Angleterre), pour l'épuisement des eaux des mines, et qui ne sont autre chose que des machines à simple effet de Watt, auxquelles on

té de notables perfectionnements. Mais avant de nous occuper de cette description, il est indispensable d'expliquer ce que l'on entend par la *détente de la vapeur*.

II. Détente de la vapeur. — Nous avons dit que, dans la machine de Watt, *fig. 486*, la soupape d'admission G reste ouverte pendant tout le temps que le piston met à descendre. Pendant ce temps, la vapeur passe librement de la chaudière dans le cylindre : l'ébullition de l'eau dans la chaudière fournit à chaque instant une quantité de vapeur capable de remplacer celle qui s'en va. Il en résulte que la face supérieure du piston est toujours pressée de la même manière. Supposons maintenant que la soupape G se ferme pendant une partie de la course descendante du piston. Dès le moment qu'elle sera fermée, la quantité de vapeur qui se trouve dans la partie supérieure du cylindre ne pourra plus augmenter. Cependant celle qui s'y trouve continuera à presser le piston et le faire descendre ; mais en même temps elle se dilatera, et sa pression élastique diminuera en conséquence de plus en plus, ce qui empêchera pas qu'elle n'amène le piston jusqu'au bas du cylindre, si la machine est convenablement disposée. Dans la première partie de la course descendant du piston, tant que la soupape d'admission est ouverte, on dit que la vapeur agit à *pleine pression* ; à partir du moment où la soupape d'admission est fermée, on dit que la vapeur agit *avec détente*.

On se demande maintenant quel avantage il peut y avoir à faire agir la vapeur avec détente, dans une portion de la course du piston, au lieu de la faire agir constamment à pleine pression. Supposons, pour nous faire une idée, que la soupape d'admission se ferme au moment où le piston est au milieu de sa course. Il est bien clair que, dans ce cas, la vapeur ne pourra pas produire autant d'effet que si elle agissait à pleine pression pendant toute la course du piston. Mais aussi la quantité de vapeur employée ne sera que la moitié de ce qu'elle aurait été dans ce cas ; la dépense en combustible devra donc être réduite de moitié, puisque, toutes choses égales d'ailleurs, la quantité de combustible consommée est évidemment proportionnelle à la quantité de vapeur produite. Pour s'assurer s'il y a avantage à faire agir la vapeur avec détente, il suffit donc de s'assurer si, par ce moyen, on réduit la dépense dans un plus grand rapport que l'on produit. Or c'est ce que nous reconnaitrons sans peine. Car la quantité de travail (§ 76) effectuée par l'action de la vapeur sur le piston, pendant la première moitié de sa course, c'est-à-dire tant que la soupape d'admission est ouverte, est précisément la moitié de celle qui aurait été effectuée par la vapeur agis-



avantage réel. Si l'on veut obtenir le même travail avec une machine à détente qu'avec une machine où la vapeur est à pleine pression, il suffira de faire le cylindre de la première grand que celui de la seconde, dans un rapport de détente que l'on veut produire : et la première, tout en étant aussi puissante que l'autre, exigera moins de vapeur, ce qui revient au même, il faudra moins de combustible pour lui fournir la vapeur nécessaire à sa marche.

Pour qu'on se fasse une idée nette de l'avantage de l'emploi de la vapeur avec détente, nous allons donner des quantités de travail qu'une même masse de vapeur peut produire, suivant qu'on la fait agir en la détendant plus ou moins. Concevons comment ces quantités de travail peuvent se représenter le piston soumis à des pressions plus faibles pendant que la vapeur se détend, et si la durée totale de la détente soit décomposée en un très grand nombre de petites portions, pendant chacune desquelles la pression peut être regardée comme constante : en multipliant la pression moyenne correspond à chacun de ces intervalles de temps par le chemin parcouru le piston pendant ce temps (§ 76), et faisant la somme de tous les produits ainsi obtenus, on aura la quantité de travail effectuée pendant la détente. Il suffira d'ajouter à cette somme le travail effectué par la vapeur avant que la détente commence.

| FRACTION
de la course
commence la
détente. | TRAVAIL
produit. | FRACTION
de la course
où commence la
détente. | TRAVAIL
produit. |
|---|---------------------|--|---------------------|
| 1 | 4,000 | 0,5 | 1,693 |
| 0,9 | 1,105 | 0,4 | 1,916 |
| 0,8 | 1,223 | 0,3 | 2,204 |
| 0,7 | 1,357 | 0,2 | 2,609 |
| 0,6 | 1,509 | 0,1 | 3,302 |

L'idée de faire agir la vapeur avec détente est due à Watt. Mais c'est que postérieurement à lui qu'on en a fait l'application comme dans la construction des machines à vapeur.

§ 422. **Machine à vapeur de Cornouailles.** — La machine qui actuellement employée dans le comté de Cornouailles, pour l'épuisement des eaux des mines, est, ainsi que nous l'avons déjà dit, la machine à simple effet de Watt, à laquelle on a apporté de notables perfectionnements, parmi lesquels on doit placer au premier rang l'emploi de la détente. La fig. 487 représente l'ensemble d'une machine de ce genre. Le piston moteur se meut à l'intérieur du cylindre A. Sa tige B est articulée en C à l'une des extrémités d'un balancier CDE. Le mouvement de va-et-vient du piston donne lieu à un mouvement d'oscillation du balancier autour de son axe D, et ensuite à un mouvement de va-et-vient de la tige F suspendue à l'autre extrémité de ce balancier. La tige F descend dans toute la profondeur d'un puits de mine, et doit y faire mouvoir des pompes : c'est autre chose que la maîtresse tige dont nous avons parlé à l'occasion des pompes de mines (§ 361). L'action de la vapeur n'a pour autre objet que de soulever la tige F ; cette tige, en retombant ensuite sous l'action de son poids, produit le refoulement de l'eau du puits dans les tuyaux d'ascension correspondant aux divers étages de pompes.

On comprendra aisément que, dans une machine de ce genre, l'emploi de la vapeur avec détente ne doit pas seulement occasionner une économie de combustible ; il en résulte encore un avantage important pour la marche de la machine. La résistance à vaincre agit avec une intensité constante, pendant tout le temps de la descente du piston moteur. Si la vapeur agissait à pleine pression, jusqu'à ce que le piston fût arrivé au bas de sa course, il en résulterait que la puissance resterait également constante pendant tout

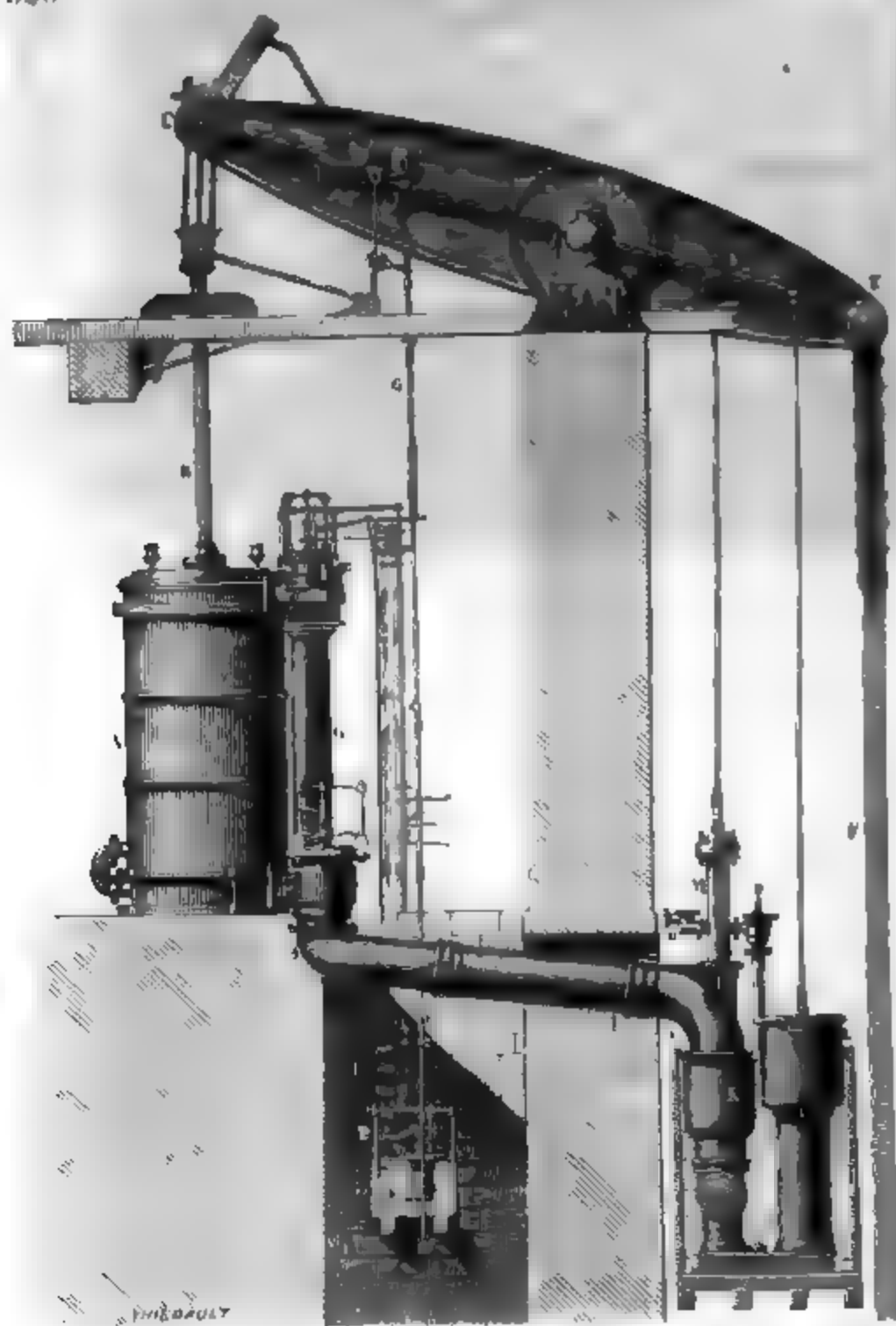


Fig. 187.

ce temps Or, la puissance doit l'emporter sur la résistance au commencement du mouvement descendant du piston, afin de pouvoir

Il donner une certaine vitesse, ainsi qu'aux diverses parties de la machine qui se meuvent en même temps que lui; donc la puissance importerait toujours de même sur la résistance pendant toute course du piston, et, par suite, le mouvement de la machine accélérerait constamment; donc enfin il en résulterait un choc du piston contre le fond du corps de pompe, choc qu'on doit éviter à cause des inconvénients de plus d'un genre qu'il occasionne. L'emploi de la vapeur avec détente permet de faire disparaître ce choc. On conçoit, en effet, que la pression exercée par la vapeur sur le piston étant d'abord constante, et allant ensuite en diminuant progressivement, pourra l'emporter pendant quelque temps sur la résistance à vaincre, puis bientôt devenir trop faible pour lui faire équilibre; le mouvement du piston s'accélérera donc d'abord, pour se ralentir ensuite (§ 131); et, en conséquence, il pourra se faire que le piston n'arrive au bas de sa course qu'avec une vitesse nulle ou presque nulle.

La machine fait mouvoir d'elle-même les divers mécanismes nécessaires à sa marche. Une longue tige GG, qui est liée au balancier, et que l'on nomme la *poutrelle*, sert à ouvrir et fermer en temps convenable les soupapes d'admission, d'équilibre, et d'exhaustion, ainsi que nous l'expliquerons bientôt. Le tuyau H sert à faire communiquer le haut et le bas du cylindre A, par l'ouverture de la soupape d'équilibre, afin de permettre au piston de remonter sous l'action du poids de la tige F. Le tuyau II fait communiquer le bas du cylindre avec le condenseur K, lorsque la soupape d'exhaustion est ouverte. Le condenseur est une capacité fermée qui se trouve au milieu d'une bûche contenant de l'eau froide, et dans laquelle l'eau de la bûche pénètre constamment, sous forme de jet, par une ouverture pratiquée à cet effet.

Une pompe L, dont le piston est attaché par une longue tige au balancier CDE, sert à retirer du condenseur l'eau qui s'accumule constamment à sa partie inférieure, et qui vient, soit de l'eau d'injection, soit de la vapeur condensée. A chaque coup du piston de la pompe L, la totalité de l'eau du condenseur en est retirée, et, en outre, ce piston agit vers la fin de sa course en aspirant une partie de l'air contenu dans le tuyau I et dans le condenseur K: c'est ce qui fait que la pompe L porte le nom de *pompe à air*. Si cette pompe ne retirait du condenseur que l'eau qui y arrive constamment, il s'y accumulerait des quantités d'air de plus en plus grandes, ce qui ferait que bientôt la pression dans le condenseur ne serait pas inférieure à la pression atmosphérique: et dès lors la condensation de la vapeur deviendrait inutile, puisqu'on

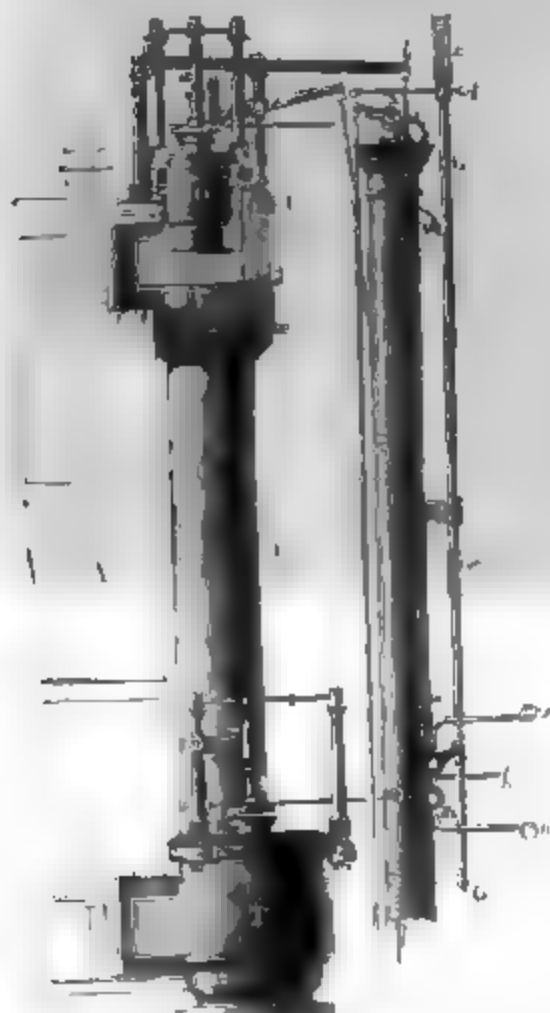


FIG. 188.

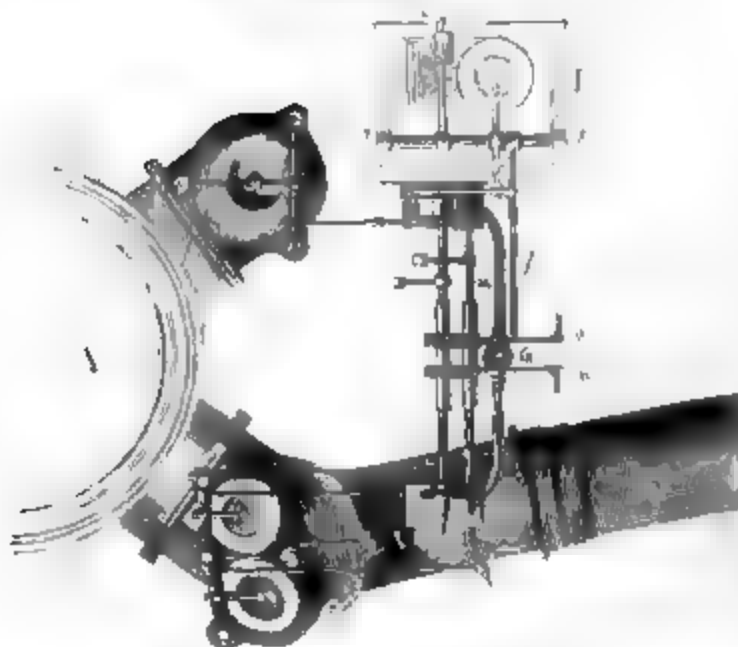


FIG. 189.

arriverait au même résultat en la faisant dégager librement dans l'atmosphère. Cet air, quel on a besoin de retirer du condenseur, y est amené en partie par l'eau d'injection qui en contient en dissolution, et en partie par la vapeur qui entraîne avec elle celui qui était en dissolution dans l'eau introduite dans les chaudières.

Une autre pompe M, mue également par la machine, prend l'eau par le tuyau N, une portion de l'eau chaude que la pompe a tirée du condenseur, et la refoule dans les chaudières, par un tuyau qui s'embranché en O. Cette eau est destinée à remplacer constamment celle qui sort des chaudières.

ne de vapeur, afin d'y maintenir toujours une même quantité. La pompe M est désignée sous le nom de *pompe alimentaire*. 423. Voyons maintenant de quelle manière les soupapes peuvent être alternativement ouvertes et fermées par la machine elle-même. Pour cela nous nous servirons des *fig. 488 et 489* dont la première est la reproduction, à une plus grande échelle, de la partie *a fig. 487*, où se trouvent les mécanismes que nous voulons décrire, et la seconde est un plan de cette même partie de la machine.

On voit en Q une capacité cylindrique dans laquelle est située la première soupape destinée à modérer plus ou moins le passage de la vapeur de la chaudière dans le cylindre, suivant que la résistance à vaincre par l'action de la vapeur est plus ou moins grande. Cette soupape, que l'on nomme *soupape modératrice*, ne doit pas s'ouvrir ni se fermer pendant la marche de la machine: elle doit conserver constamment la position qu'on lui a donnée tout d'abord, afin que le mouvement descendant du piston ne s'effectue ni trop lentement ni trop rapidement. La tige *a* de cette soupape traverse le fond supérieur de la boîte Q qui la contient; un levier *bc*, fixé sur l'axe *c*, permet de faire tourner cet axe sur lui-même, et de soulever plus ou moins la tige *a*, au moyen d'un autre levier que porte le même axe; enfin une tringle *dd*, articulée à l'extrémité du levier, s'abaisse jusqu'à la portée du conducteur de la machine, qui peut faire monter ou descendre son extrémité inférieure, de manière à donner une ouverture convenable à la soupape modératrice.

C'est en *z*, au-dessous de la boîte Q, que s'embranché le tuyau qui amène la vapeur de la chaudière dans la machine. La vapeur traverse donc de bas en haut l'ouverture de la soupape modératrice. Là elle se rend dans la boîte R de la soupape d'admission, qui est placée à côté de la précédente, et pénètre dans le haut du cylindre, lorsque cette soupape est ouverte. Après avoir agi sur le piston pour le faire descendre, elle sort du haut du cylindre A par la boîte S de la soupape d'équilibre, située au haut du tuyau H, et se rend par ce tuyau dans le bas du même cylindre, pendant que le piston remonte. Enfin la soupape d'exhaustion située en T vient de s'ouvrir, et la vapeur passe du cylindre dans le tuyau H qui la mène au condenseur.

Lorsque le piston est sur le point de descendre, il faut que la soupape d'exhaustion s'ouvre d'abord, puis que la soupape d'admission s'ouvre quelques instants plus tard, pour que, dans l'interim, la vapeur contenue dans le bas du cylindre ait le temps de se condenser en grande partie. Le piston ayant déjà parcouru une frac-



soupapes d'exhaustion et d'admission en même la soupape d'équilibre, c'est-à-dire au moment la fin de sa course ascendante : par cette disposition immédiate, et la machine fonctionne continue. Mais, au lieu de cela, on a le mouvement du piston d'une manière intermittente : on laisse la machine en repos pendant un temps après chaque double course descendante et ascendante. C'est la nature du travail spécial qu'effectuent nous nous occupons, qui a conduit à produire dans leurs mouvements. Les pompes mues par doivent épuiser l'eau contenue dans le puits, à l'extrémité par les fissures du terrain, et par les galeries aboutissent au puits ; on conçoit donc que ces pompes ont besoin de fonctionner constamment, mais que le vent donne pendant chaque heure qu'un non sur la quantité d'eau qui se rend pendant ce puits.

Pour arriver à produire ce mouvement intermittent à vapeur, on ne fait pas ouvrir les soupapes d'admission par la machine elle-même, mais par une autre machine que l'on voit en P, fig. 487 et 489, et auquel

donnés à l'action de la poutrelle GG, et il tend à redescendre sous le poids de son poids, et aussi en vertu du contre-poids *i* fixé à l'extrémité du levier qui fait corps avec l'axe *ff*. Mais l'eau qui s'est introduite dans le corps de pompe de la cataracte ne peut en sortir que par l'ouverture qu'on rend à volonté plus ou moins étroite; il résulte que le piston ne peut descendre que lentement, en faisant sortir l'eau par cette ouverture. Le levier *g* se relève donc aussi lentement. C'est ce mouvement ascendant du levier *g* que l'on utilise pour ouvrir en temps convenable les soupapes d'exhaustion et d'admission, afin de faire donner à la machine à vapeur un coup de piston. On conçoit dès lors que l'on peut régler à volonté l'intervalle de temps qui s'écoule entre deux coups de piston consécutifs de la machine, en rétrécissant plus ou moins l'ouverture par laquelle l'eau sort du corps de pompe de la cataracte, ce qui produit une lenteur plus ou moins grande dans le mouvement ascendant du levier *g*.

Il n'expliquerons pas en détail tout le mécanisme qui sert à ouvrir et fermer en temps utile les diverses soupapes de la machine; nous nous contenterons de faire connaître complètement ce qui se rapporte à la soupape d'exhaustion, ce qui suffira pour qu'on ait une idée de la manière dont la machine peut se suffire à elle-même, sans exiger, comme à l'origine, la présence d'un ouvrier spécialement chargé de manœuvrer les soupapes.

La tige verticale s'appuie par son extrémité inférieure sur le levier *g* de la cataracte; on ne la voit pas sur la *fig. 488*, parce qu'elle est cachée par la poutrelle GG. Cette tige monte lentement au même temps que le levier *g*, et lorsqu'elle s'est élevée suffisamment, une saillie qui lui est fixée latéralement vient toucher la face inférieure du petit levier horizontal *k*. La tige continuant à monter, le levier *k* est soulevé. Une tringle *l*, supportant un contre-poids à son extrémité inférieure, est articulée à un petit levier fixé à un axe horizontal *m*, et tend constamment à faire tourner cet axe, en abaissant le levier qui la supporte. Mais l'axe *m* porte une espèce de dent qui butte contre une autre dent fixée à la face inférieure du levier *k*, et qui s'oppose ainsi à ce que cet axe tourne sous l'action du contre-poids porté par la tringle *l*. Lorsque le levier *k* a été soulevé par la tige que la cataracte fait monter, la dent de l'axe *m* est libre, et cet axe tourne en cédant à la force de traction qu'exerce la tringle *l*. Alors le manche *n*, fixé à l'extrémité de l'axe *m*, se relève, et une tringle *op* articulée à un petit levier qui est également cet axe se trouve brusquement tirée vers la droite; le levier vertical *pq*, articulé en *p* avec la tringle *op*, et fixé à l'axe



pape d'admission s'ouvre par l'action *a* qui
lever en même temps le manche *u*. Alors *h*
l'action de la vapeur, et la poutrelle *GG* d
long taquet *x*, fixé à la poutrelle, abaisse bi
maintient ainsi la soupape d'admission ferme
la course du piston, pour que la vapeur n'ag
tente. Lorsque le piston arrive au bas de sa c
la poutrelle abaisse le manche *n*, de manièr
d'exhaustion. En même temps la poutrelle *C*
de la cataracte; la tige verticale qui s'appuie
aussi, et les leviers *k*, *l*, peuvent s'abaisser
nouveau à l'ouverture des soupapes d'admi
jusqu'à ce que la cataracte vienne soulever c
ou le manche *n* est ramené dans la position
sous l'action du taquet *y* de la poutrelle, l'axe
che un contre-poids qui ouvre la soupape d'e
même temps le manche *v*. Alors le piston rei
remonte avec lui, et, lorsqu'elle est sur le p
de sa course, elle soulève le manche *v*, au m
l'on ne peut pas voir sur la figure. La sc
trouve ainsi fermée, et la machine s'arrête c
ce que la cataracte ouvre de nouveau les sou
d'admission.

A avec B doit être interceptée, lorsque la soupape est fermée. On voit en C une pièce fixe, formée de six cloisons qui rayonnent au-

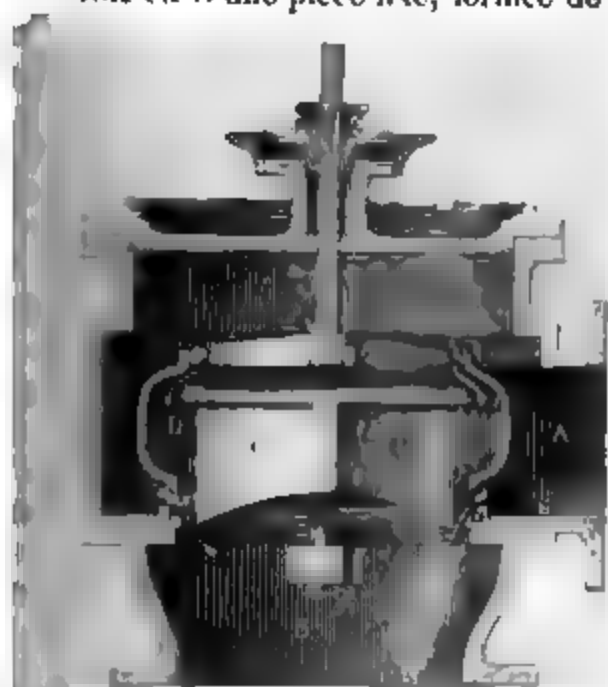


Fig. 190.



Fig. 191.

tour d'un axe central, et terminée dans le haut par un disque circulaire, qui fait corps avec ces cloisons, et qui recouvre les espèces de compartiments compris entre elles. Cette pièce fixe C, qui forme le siège de la soupape, est à jour sur tout son contour, en sorte qu'elle laisse facilement passer la vapeur de A en B. La soupape B est une sorte de fourreau qui enveloppe le siège C, et qui peut glisser le long des bords extérieurs de ses cloisons. Lorsqu'elle est abaissée autant que possible, elle s'appuie sur les parties coniques *a, a*, qui ne présentent que peu de largeur; lorsque, au contraire, elle est soulevée, comme le montre la figure, elle laisse passer la vapeur par les diverses ouvertures qui sont indiquées par des flèches. On voit que, par cette disposition, la soupape n'a pas besoin d'être soulevée d'une grande quantité pour livrer un large passage à la vapeur. D'un autre côté, la soupape étant percée à sa partie supérieure d'une ouverture circulaire presque aussi grande que celle qui existe à sa partie inférieure, la différence des forces élastiques de la vapeur, en A et en B, tend beaucoup moins à l'appuyer sur son siège que si elle était simplement formée d'un disque à bords coniques, comme on l'avait supposé dans la figure théorique de la machine de Watt à simple effet (fig. 486, page 625).

§ 195. Parallelogramme articulé. — On voit sur la fig 487

(page 630) un mode particulier de liaison de la tige B du balancier à l'extrémité C du balancier. Ce mode de liaison, dont l'inventeur a Watt, est désignée sous le nom de *parallélogramme*. Voici en quoi il consiste :

Trois pièces AB, CD, BD, fig. 492, sont articulées, elles,

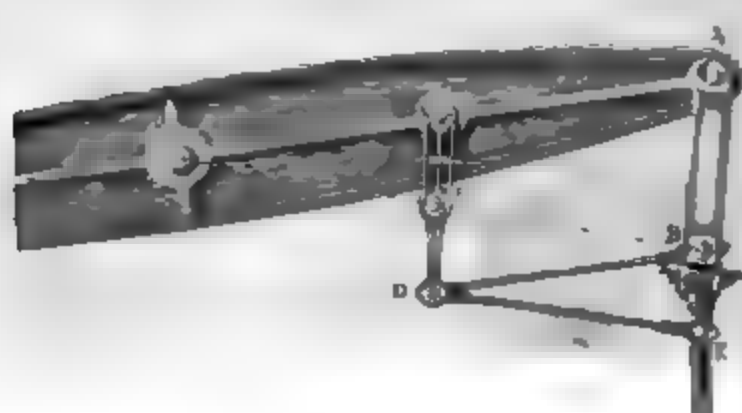


Fig. 492.

le bal
oints
trois p
la par
balanc
tuent
lelogri
peut e
forme
des m
qui e
chacou

sommets. Dans le mouvement d'oscillation du balancier son axe O, l'extrémité A décrit un arc de cercle dont le centre est O. Le point B décrirait également un arc de cercle si le parallélogramme ABCD ne se déformait pas : mais à raison de la mobilité relative des pièces qui le composent, on peut le déformer à mesure que le balancier oscille, de telle manière que le point B ne sorte pas d'une ligne verticale. Si l'on trouvait le moyen de rendre obligatoire la forme spéciale du parallélogramme, on pourrait attacher l'extrémité de la tige verticale d'un piston : et cette tige monterait et descendrait en même temps que le balancier oscillerait, mais constamment dans la même direction, sans que son extrémité, ni à droite, ni à gauche, par suite de sa liaison avec le balancier. C'est ce à quoi Watt est parvenu d'une manière très simple. Il a observé que, si l'on oblige le point B à rester sur une ligne droite verticale pendant toute une oscillation du balancier, le point D de son côté décrit une ligne courbe qui n'est pas un arc de cercle, mais il en a conclu que, si l'on obligeait le point D à décrire l'arc de cercle qui se confondrait complètement avec cette courbe, le point B ne sortirait plus de la ligne droite qu'on lui faisait décrire précédemment. Or, pour obliger le point D à décrire un arc de cercle, il suffit évidemment de le relier au centre E de cet arc de cercle par une tige DE. Par cette disposition, le point

parallélogramme reste toujours à une même distance du point E, quelle que soit la position que prenne le balancier, le parallélogramme se déforme progressivement en conséquence de cette liaison du point D, et le point B décrit une ligne courbe qui se confond presque avec une ligne droite verticale. On peut donc attacher la tige du piston en B, et pendant tout le mouvement de va-et-vient que prendra le piston dans le cylindre, l'extrémité de sa tige ne sera écartée de la direction de l'axe du cylindre que de quantités insignifiantes de part et d'autre.

Habituellement les dimensions qu'on donne aux diverses pièces qui composent le parallélogramme articulé sont telles que le point E, centre du mouvement du point D, se trouve sur la direction de la ligne droite que doit décrire le point B; c'est ce qui fait que, sur la *fig. 492*, le point E semble être lié à la tige du piston. Mais il n'en est rien; ce point E, autour duquel le petit balancier DE oscille, est situé en avant de la tige du piston, et reste complètement fixe, tandis que cette tige monte et descend derrière lui. On voit sur la *fig. 487* un parallélogramme où la position du point E est différente; ce point est notablement à gauche de la tige du piston.

Il existe, sur le côté CD du parallélogramme articulé, un point F qui jouit de la propriété de se mouvoir à très peu près suivant une verticale, comme le point B. Ce point est situé à la rencontre du côté CD, avec la ligne qui joindrait le point B au centre O du mouvement du balancier. On profite ordinairement de cette circonstance pour transmettre le mouvement au piston d'une pompe, dont on attache la tige au point F. L'étendue du mouvement de ce point F est évidemment plus petite que celle du point B.

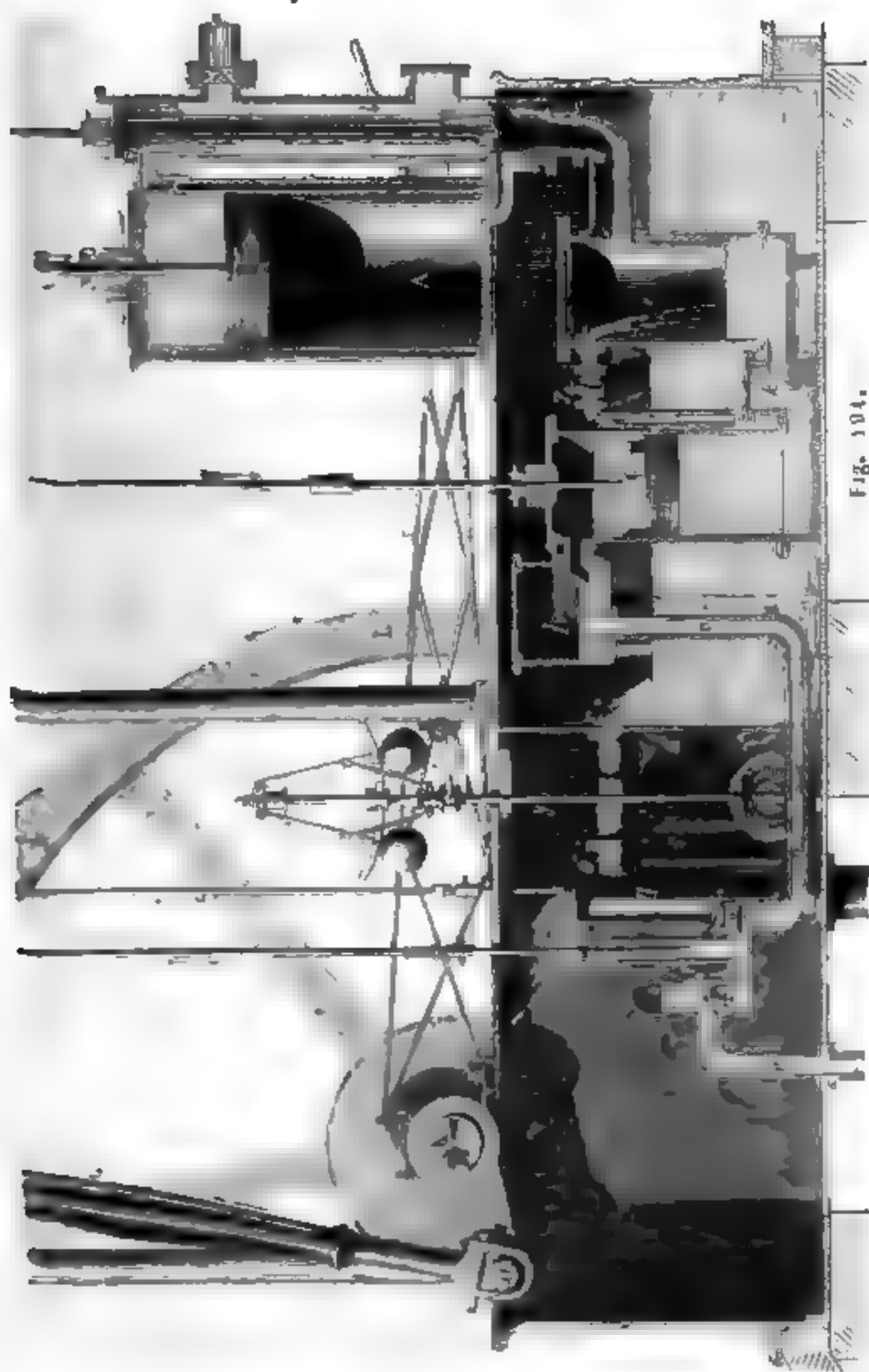
§ 426. **Machine à vapeur de Watt à double effet.**— La machine à vapeur ne pouvait devenir un moteur universel, comme les roues hydrauliques, qu'autant qu'elle produirait le mouvement de rotation d'un arbre, mouvement qui peut être transmis à toute espèce de mécanisme, et qui peut, en conséquence, servir à effectuer toute espèce de travail. Mais, pour cela, il était important que l'action de la vapeur ne fût pas intermittente, comme dans la machine à simple effet; il fallait que le piston moteur fût constamment poussé par elle, quel que fût le sens dans lequel il marcherait à l'intérieur du cylindre. C'est pour arriver à ce résultat que Watt a imaginé la machine à vapeur à double effet. Cette machine, que nous allons décrire, est le type des machines à vapeur de formes diverses qui font mouvoir maintenant une quantité innombrable d'ateliers, ainsi que des appareils moteurs des bateaux à vapeur, et des locomotives dont on se sert sur les chemins de fer.

La fig. 493 représente l'ensemble de la machine de Watt. La fig. 494 en est une coupe, faite à une plus grande échelle, et des



Fig. 493.

lune à faire voir les parties intérieures. Le cylindre A est fermé à ses deux extrémités ; c'est à son intérieur que le piston B se meut tantôt dans un sens, tantôt dans l'autre. La tige C du piston est reliée par un parallélogramme articulé à l'extrémité D du balancier DEF ; et le mouvement de va-et-vient du piston détermine un mouvement d'oscillation du balancier autour de son axe E. De l'autre extrémité F du balancier part une bielle G, qui vient saisir en H le bouton d'une manivelle fixée à l'extrémité d'un arbre horizontal K. Le mouvement d'oscillation du balancier donne lieu à un mouvement de va-et-vient de la bielle, qui, en agissant sur la manivelle, communique à l'arbre K un mouvement de rotation continu. Un volant L adapté à l'arbre K est destiné à régulariser le mouvement de cet arbre, en répartissant sur une grande masse, située à une grande distance de l'axe de l'arbre, les irrégularités d'action qui



existent toujours lorsqu'un mouvement de rotation est produit au moyen d'une bielle et d'une manivelle (§ 430). Ce volant permet d'ailleurs à l'arbre de dépasser facilement ce que l'on nomme les *points morts*, c'est-à-dire les positions pour lesquelles la bielle et la manivelle ont la même direction, soit qu'elles se recouvrent mutuellement, soit qu'elles se trouvent dans le prolongement l'une de l'autre. On voit en effet que, lorsque l'arbre se trouve dans l'une ou dans l'autre de ces deux positions, la force appliquée à la bielle, dans le sens de sa longueur, ne tend à faire tourner la manivelle ni d'un côté ni de l'autre, l'arbre ne peut donc continuer à tourner qu'en vertu de sa vitesse acquise, et cette continuation de mouvement se produit d'autant plus facilement que l'arbre entraîne avec lui une plus grande masse animée d'une plus grande vitesse.

La vapeur est amenée de la chaudière dans le cylindre par le tuyau *a*, fig. 494. Elle pénètre d'abord dans une capacité *b*, à laquelle on donne le nom de *boîte à vapeur*, et d'où elle doit se rendre, soit dans le haut du cylindre, soit dans le bas, suivant que le piston *B* descend ou monte. Une pièce spéciale que l'on nomme le *tiroir*, se meut dans la boîte à vapeur, et est destinée à faire passer la vapeur qui vient de la chaudière, tantôt au-dessus, tantôt au-dessous du piston, et en même temps à faire communiquer avec le condenseur la partie du cylindre vers laquelle le piston marche. La fig. 495 représente le tiroir seul. C'est une sorte de tuyau creux, qui s'élargit à ses deux extrémités, et qui est muni d'une tige destinée à le faire mouvoir dans la boîte à vapeur. Les fig. 496 et 497 représentent les deux positions différentes que doit prendre le tiroir suivant que le piston descend ou monte; elles ne sont que la reproduction plus en grand d'une partie de la fig. 494. On voit que le tiroir s'appuie par les petites faces *cc* sur les surfaces planes qui avoisinent les ouvertures aboutissant au haut et au bas du cylindre. Des garnitures d'étoupe sont d'ailleurs disposées sur le reste de son contour, vers ses deux extrémités, de manière qu'il s'adapte exactement de tous côtés avec les parois de la boîte à vapeur. Par cette disposition, on voit que la boîte à vapeur est divisée en deux parties entièrement distinctes. L'une de ces deux parties, formée de l'espace annulaire situé tout autour du tiroir, communique constamment avec le tuyau *a* qui amène la vapeur; l'autre partie, qui se compose des deux extrémités de la boîte à vapeur, réunies l'une à l'autre par l'intérieur du tiroir, communique toujours avec le tuyau *d*, fig. 494, qui aboutit au condenseur *e*. La fig. 496 montre le tiroir dans sa position la plus élevée; la vapeur qui vient de la chaudière passe autour du tiroir, et se rend dans la partie supé-

MACHINE A VAPEUR DE WATT A DOUBLE EFFET. 643



Fig. 495.

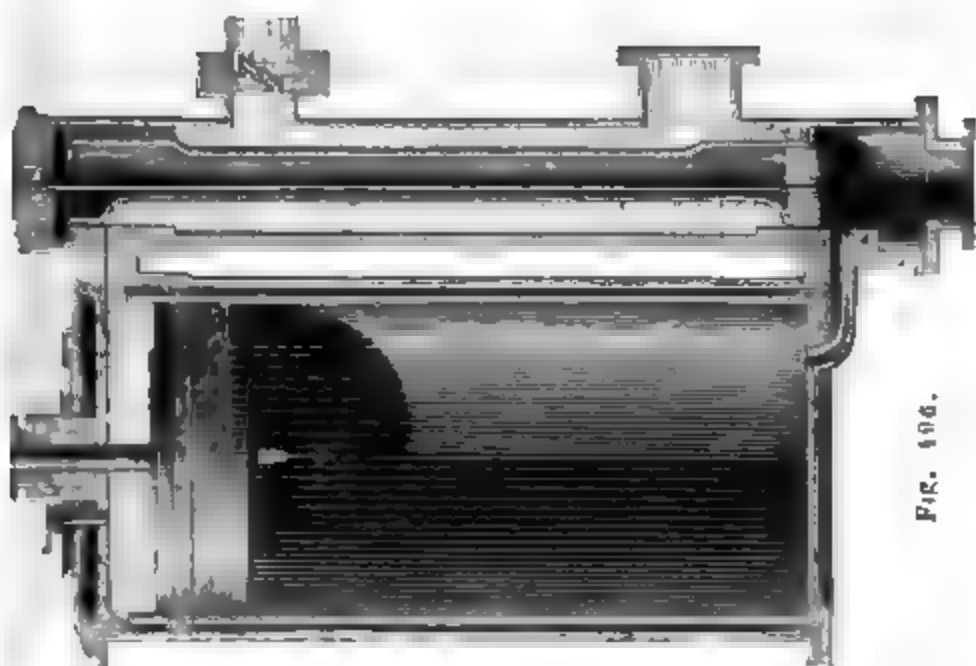


Fig. 496.

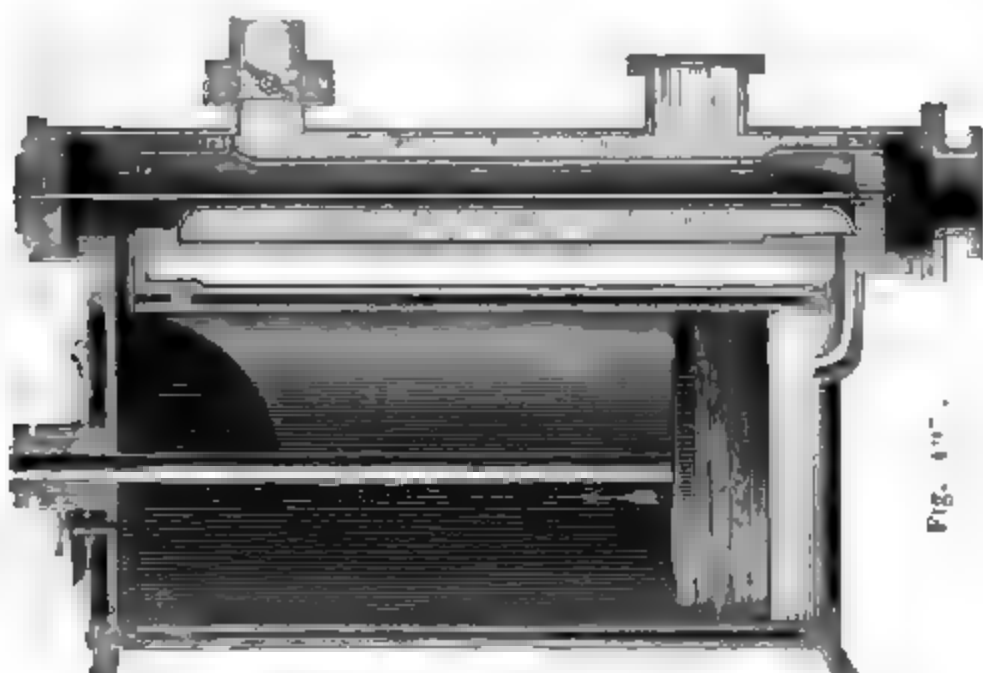


Fig. 497.



condenseur *e*. Ce tuyau est muni d'un robinet *g*, produit un étranglement plus ou moins grand, affinité d'eau qui s'introduit en *e*, pour y condenser l'eau chaude qui s'accumule au fond du condenseur, et de la vapeur condensée, que de l'eau de condenser le tuyau *f*, en est constamment retirée par une pompe, comme l'indique son nom, sert en même temps une partie de l'air contenu dans le condenseur (avons déjà expliqué à l'occasion de la machine § 422). Le piston *h* de la pompe à air est articulé, au point du parallélogramme articulé qui porte la lettre *F* sur la fig. 492 (page 638), et qui jouit de se mouvoir à très peu près suivant une ligne droite aussi bien que le point *B*. Ce piston *h* est percé et garni de soupapes *i* qui s'ouvrent de bas en haut, fait communiquer le condenseur avec le bas de la machine également muni d'une soupape *k*, qui s'ouvre du haut.

L'eau chaude, que la pompe à air extrait du condenseur, se rend dans une bûche *l*. Une portion prise par la pompe alimentaire, qui la refoule en haut pour remplacer celle qui en sort sous forme de vapeur, de la pompe alimentaire est aussi mis en communication avec la bûche *l*.

Le mouvement alternatif que doit prendre le tiroir, pour permettre à la vapeur d'agir tantôt sur la face supérieure, et tantôt sur la face inférieure du piston, lui est transmis par la machine elle-même. A cet effet l'arbre K est une pièce P, fig. 498, dont le contour est circulaire, et dont le centre est placé en dehors de l'axe autour duquel tourne l'arbre K. Cette pièce est désignée sous le nom d'*excentrique*. Elle est enlappée par un anneau Q, à l'intérieur duquel elle peut glisser en tournant. Pendant le mouvement de l'arbre K, la partie de l'excentrique P qui fait le saillant sur cet arbre, est reportée tantôt vers la droite, tantôt vers la gauche. L'anneau Q, lié aux tringles ss, ne pouvant pas tourner avec l'excentrique, se trouve poussé par lui, soit d'un côté, soit de l'autre; et il en résulte un mouvement de va-et-vient des tringles ss. Ces tringles se réunissent à leurs extrémités opposées à l'anneau Q, et y présentent un cran à l'aide duquel elles saisissent le bouton t d'un levier coudé tuv. Par suite du mouvement de va-et-vient des tringles ss, le levier tuv tourne autour de son point fixe u, tantôt dans un sens, tantôt dans l'autre: et son mouvement alternatif se transmet à une tige verticale, qui est articulée d'une part, en v, au levier coudé, et d'une autre part à la tige du tiroir. On voit donc que la machine, une fois mise en mouvement, s'y maintiendra d'elle-même, puisqu'au moyen de l'excentrique P, convenablement installé, elle amène toujours le tiroir dans la position qu'il doit prendre à chaque instant, pour que la vapeur continue à exercer son action. Pour mettre la machine en mouvement, on souleve le mancho qui termine les tringles ss, afin de rendre le levier tuv libre de se mouvoir sans elles: puis, en saisissant le mancho qui termine le bras uv, on fait mouvoir le levier, de manière à donner au tiroir successivement les positions qu'il doit prendre, pour que la vapeur puisse agir alternativement sur les deux faces du piston. Aussitôt que la machine marche, on rétablit la communication des tringles ss avec le levier tuv, et le mouvement continue de lui-même.



Fig. 108.



une rainure circulaire, analogue à une gorge de p fixé par une de ses extrémités à un axe horizon l'autre extrémité par une fourchette dont les deux gent dans la rainure dont nous venons de parler. nullement le mouvement de rotation de l'anneau tourne librement entre les branches de la four mouvement de rotation vient à s'accélérer, les l'anneau monte, et la fourchette du levier z est so chette s'abaisse, au contraire, si le mouvement ralentit. On voit donc que le levier z fera tourn auquel il est fixé, soit dans un sens, soit dans l'a la machine marchera plus vite ou plus lentemen se transmet, par une série de tringles et de leviers d'imaginer la disposition, jusqu'à l'axe d'une installée dans le tuyau qui amène la vapeur de la boîte à vapeur, comme on le voit sur les *fig. 1* suite de là que la soupape se dispose de manière plus le passage de la vapeur, à mesure que le machine devient plus rapide; tandis que, s'il dev livre à la vapeur un passage plus large qu'à l'on

La machine à vapeur à double effet a reçu, des modifications ayant pour objet, soit un meilleur

leur du cylindre, malgré les imperfections que pouvait présenter cette surface. Mais on avait besoin d'y toucher souvent, afin de remédier à l'usure des étoupes qui était très rapide. Les perfectionnements apportés au travail des métaux ont permis de supprimer complètement la garniture d'étoupes, et d'employer des pistons entièrement métalliques. On parvient en effet maintenant à raboter la surface intérieure d'un cylindre, ou, comme on dit, à *ultrer* ce cylindre, de manière à faire disparaître toutes les inégalités qu'elle pouvait présenter; en sorte qu'un piston à contour bien circulaire, qui s'adapterait exactement dans le cylindre en un des points de sa longueur, s'y adapterait également bien dans tous les autres points. Il est cependant nécessaire de laisser au contour du piston une certaine flexibilité; car, sans cela, il serait bien difficile d'établir un contact exact entre lui et le cylindre, sans qu'il en résultât une trop grande adhérence, et même une sorte de grippement entre les surfaces. Aussi dispose-t-on les pistons comme on en voit ici deux exemples, fig. 499 à 502. Chacun des deux pistons est formé, pour



Fig. 499.



Fig. 501.



Fig. 500.



Fig. 502.

ainsi dire, de deux assises de secteurs métalliques, placés à la suite les uns des autres, de manière à constituer comme deux anneaux superposés. Ces anneaux sont compris entre deux disques circulaires d'un diamètre un peu plus petit, sans cependant être assez

serrés entre ces disques pour que les diverses pièces dont il composent ne puissent pas glisser en s'éloignant ou en se rapprochant de l'axe du piston. Des ressorts, placés à l'intérieur, tendent constamment à repousser au dehors les secteurs métalliques, qui ne peuvent ainsi s'appliquer exactement sur la surface du cylindre qui peuvent cependant céder, en se rapprochant de l'axe, à quelque circonstance particulière les y oblige. Les ressorts du piston représentés par les fig. 499 et 500 sont en assez grand nombre, et sont d'hélices, ceux de l'autre piston, fig. 504 et 502, sont de simples lames, fixées par leurs milieux, et agissant par leurs extrémités sur les secteurs métalliques.

§ 428 *Excentrique triangulaire.* — Nous avons vu que, que la vapeur pût arriver tantôt au-dessus, tantôt au-dessous du piston, dans la machine à double effet, il fallait faire prendre au tiroir deux positions différentes. Pour que les choses se passent exactement comme nous l'avons supposé, il faudrait que le tiroir restât immobile dans chacune de ces positions, tant que le mouvement du piston resterait le même; et que ce tiroir passât soudainement d'une position à l'autre, aussitôt que le piston de changer le sens de son mouvement. L'excentrique que nous avons décrit dans la machine de Watt, et qui est destiné à faire mouvoir le tiroir, est loin de satisfaire à la condition qui vient d'être posée. Le tiroir en reçoit un mouvement continu, tantôt dans un sens, tantôt dans l'autre; il ne reste immobile dans aucune des positions qu'il prend successivement, et il ne passe pas brusquement d'une position à une autre. Aussi arrive-t-il que les ouvertures par lesquelles la vapeur doit passer de la boîte à vapeur dans le haut ou dans le bas du cylindre ne s'ouvrent et ne se ferment que peu à peu, et il en résulte que ces ouvertures sont étranglées pendant une partie de la course du piston, ce qui occasionne une perte de travail. De même, la communication entre une des parties du cylindre et le condenseur ne s'établit que peu à peu; ce qui fait qu'au commencement, la vapeur qui doit se rendre au condenseur éprouve une certaine difficulté à sortir du cylindre, et exerce en conséquence une pression résistante sur la face du piston avec laquelle elle est en contact.

Pour obvier à ces divers inconvénients de l'excentrique circulaire, on l'a remplacé par des pièces analogues, auxquelles on a conservé le nom d'excentrique. Nous citerons comme exemple l'excentrique triangulaire, fig. 503, qui est assez employé. Il se compose d'une pièce A, en forme de triangle à côtés courbes, qui est fixée à un arbre tournant B; cette pièce est engagée à l'inté-

l'un cadre rectangulaire que porte la tige CC, et agit alternativement sur les deux longs côtés de ce rectangle, de manière à donner un mouvement de va-et-vient à la tige CC, qui le communique au tiroir. D'après la forme de la pièce A, on voit que le tiroir passe plus rapidement d'une extrémité à l'autre de sa course que s'il était mû par un excentrique circulaire ; et que, de plus, il reste immobile pendant quelque temps, dans chacune de ses positions extrêmes.

On peut faire disparaître en grande partie les inconvénients que nous avons signalés, sans abandonner l'excentrique circulaire. Il suffit pour cela de donner peu de largeur aux ouvertures que le tiroir doit faire successivement communiquer avec la boîte à vapeur et avec le condenseur, et de rendre la course du tiroir notablement plus grande que cela ne serait strictement nécessaire pour donner lieu à ces changements de communication. De cette manière, les bords du tiroir n'emploient qu'une faible portion de la durée totale de sa course à passer sur chacune des ouvertures, qui ne se trouvent par conséquent étranglées que pendant un intervalle de temps de peu d'importance. Afin que les ouvertures dont il s'agit présentent un passage suffisant à la vapeur, on compense leur peu de largeur en les allongeant dans le sens perpendiculaire au mouvement du tiroir. C'est cette possibilité d'obtenir une distribution convenable de la vapeur, au moyen de l'excentrique circulaire, jointe aux avantages qu'il présente sous le rapport de la facilité de construction et de la solidité, qui fait qu'il est encore employé dans le plus grand nombre de machines à vapeur.

§ 429. **Excentrique à détente.** — Le grand avantage que présente l'emploi de la vapeur avec détente (§ 421), sous le rapport de l'économie du combustible consommé, fait qu'on a cherché à disposer les machines à double effet de manière à y introduire ce mode d'action de la vapeur. Il suffit, pour y arriver, de donner au tiroir successivement diverses positions dans chacune desquelles il reste immobile pendant un certain temps, ainsi que nous allons le faire comprendre sans peine, au moyen des fig. 504 à 507. Le tiroir

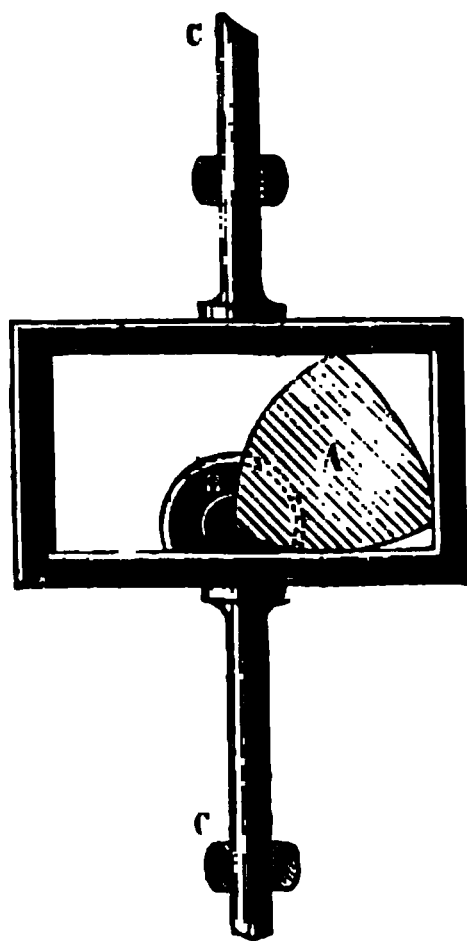


Fig. 503.

A y est réduit à sa forme la plus simple, qui est généralement adoptée maintenant : il consiste en une pièce métallique coque,



Fig. 504.



Fig. 505.



Fig. 506.



Fig. 507.

qui s'appuie par les bords de sa concavité sur la face plane ou aboutissent les trois conduits B, C, D, et qui peut glisser sur cette face, de manière à y occuper les diverses positions indiquées. Ce tiroir se meut toujours à l'intérieur de l'espace fermé, nommé *boîte à vapeur*, dans lequel arrive la vapeur fournie par la chaudière. Les conduits B et C communiquent, l'un avec la partie supérieure du cylindre, l'autre avec la partie inférieure. Le conduit intermédiaire D aboutit au condenseur.

Dans la première position du tiroir, *fig. 504*, la vapeur qui vient de la chaudière passe librement par le conduit B, et agit à pleine pression sur la face supérieure du piston. Pendant ce temps, la partie inférieure du cylindre communique avec le condenseur par le conduit C et l'intérieur du tiroir. Le piston descend en vertu de la différence des pressions qu'il éprouve sur ses deux faces. Si le tiroir remonte, pour prendre la position indiquée par la *fig. 505*, lorsque le piston n'a encore fait qu'une partie de sa course descendante, la vapeur ne peut plus passer de la boîte à vapeur dans le conduit B, et cependant le bas du cylindre communique toujours avec le condenseur. La vapeur qui se trouve dans le haut du cylindre agit donc en se détendant, et c'est sous cette action que le piston achève sa course descendante.

Si le tiroir remonte encore, pour prendre la position indiquée par la *fig. 506*, au moment où le piston a atteint le bas du cylindre, la

La vapeur de la chaudière passe par le conduit C, et vient exercer sa pression sur la face inférieure du piston ; pendant ce temps, celle qui était introduite au-dessus de lui se rend dans le condenseur, par le conduit B et l'intérieur du tiroir. Si enfin le tiroir s'abaisse d'une certaine quantité, pour prendre la position indiquée par la fig. 507, lorsque le piston n'a parcouru en montant qu'une partie de la hauteur du cylindre, la communication de la chaudière avec le bas du cylindre se trouve interceptée, sans que cependant le haut du cylindre cesse de communiquer avec le condenseur : la vapeur qui s'est introduite jusque-là sous le piston continue donc à agir en se détendant, et le pousse ainsi jusqu'au haut du cylindre. Le tiroir revenant alors dans la position de la fig. 504, le piston recommencera à descendre, et ainsi de suite.

Pour faire prendre au tiroir successivement les quatre positions dont nous venons de parler, on se sert d'un excentrique d'une forme particulière que l'on nomme *excentrique à détente*. Il se compose essentiellement d'une pièce A, fig. 508, fixée à un arbre B, auquel la machine donne un mouvement de rotation. Le contour de cette pièce A est formé de quatre arcs de cercles n, p, q, m , concentriques à l'arbre B, et reliés l'un à l'autre par des parties courbes. Deux galets C, C, portés par une tige D, qui peut glisser dans le sens de sa longueur, sont toujours en contact avec les deux bords opposés de l'excentrique A. Lorsque l'arbre B tourne, de manière que l'excentrique touche le galet supérieur, successivement par les arcs n, q, m, p , la tige D prend quatre positions différentes. Or, il est aisé de voir que ces positions correspondent précisément à celles que nous avons indiquées pour le tiroir, en sorte qu'il suffit de faire conduire le tiroir par la tige D, pour que la vapeur agisse avec détente. La fraction de la course du piston, pendant laquelle la vapeur agit à pleine pression, dépend évidemment de la grandeur qu'on a donnée aux arcs m, n , qui sont destinés à maintenir le tiroir dans ses deux positions extrêmes.

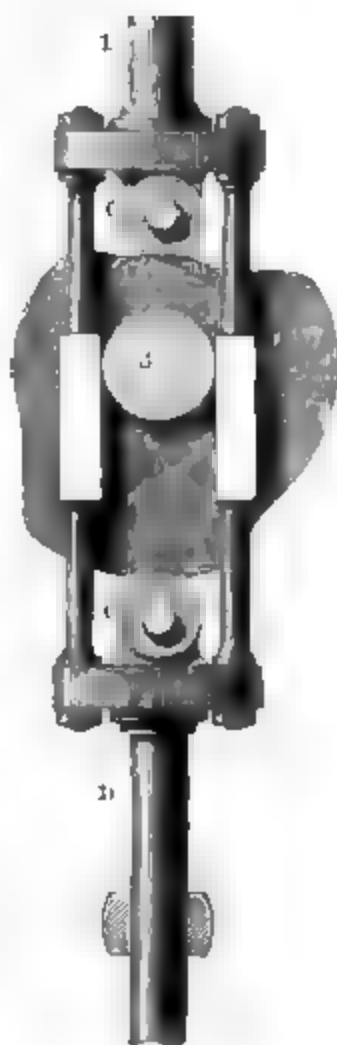


Fig. 508.

§ 430. **Détente Clapeyron.** — On a imaginé bien des dispositions différentes, pour faire agir la vapeur avec détente dans les machines à double effet. Nous n'entrerons point dans le détail de ces dispositions, qui sont plus ou moins compliquées; mais nous nous contenterons de faire connaître le moyen trouvé pour cela par M. Clapeyron, en employant un tiroir ordinaire muni par un excentrique circulaire. Ce moyen se recommande par sa grande simplicité, et convient surtout pour les machines où les mouvements sont très rapides, comme les locomotives dont nous parlerons bientôt. Le tiroir A, fig. 509, se meut comme à l'ordinaire



Fig. 509.

sur une surface plane où aboutissent les tuteurs B, C, communiquant avec les deux extrémités du cylindre, ainsi que le

tuyau D par lequel la vapeur se rend au condenseur. Mais les bords du tiroir sont munis de deux pièces M, M, dont la largeur est beaucoup plus grande que celle des ouvertures B, C. Il résulte de cette seule modification apportée au tiroir, que lorsqu'une des ouvertures B, C, cesse d'être en communication avec la boîte à vapeur, elle reste fermée pendant quelque temps, avant de communiquer avec le conduit D, par l'intérieur du tiroir. On conçoit donc que, si l'on dispose l'excentrique de manière que chacune de ces ouvertures B, C, soit fermée à un moment convenable par les bords élargis M, M, du tiroir, il pourra arriver que la vapeur agisse d'abord à pleine pression, pendant une portion de la course du piston, et ensuite avec détente, pendant le reste de cette course.

§ 431. **Machine de Woolf, à deux cylindres.** — Quelquefois on dispose, à côté l'un de l'autre, deux cylindres de même hauteur et de diamètres différents, dans lesquels la vapeur se rend successivement. Cette disposition, imaginée par Woolf, a encore pour objet de faire agir la vapeur avec détente. Les deux pistons A, B, fig. 510, sont liés l'un à l'autre par les extrémités supérieures de leurs tiges, en sorte qu'ils doivent se mouvoir ensemble, et être toujours à la même hauteur dans les cylindres C, D. Les robinets E, F, permettent à la vapeur de la chaudière de pénétrer dans le cylindre C, soit au-dessus, soit au-dessous du piston A : les robinets G, H, sont adaptés à des tuyaux à l'aide desquels on peut faire communiquer, soit le haut du cylindre C avec le bas du cylindre D, soit le bas du cylindre C avec le haut du cylindre D; enfin la vapeur

peut sortir du second cylindre, pour se rendre au condenseur, par les robinets K, L. Les robinets E, H, L, étant ouverts, et les autres



Fig. 310.

fermés, la vapeur de la chaudière presse le piston A de haut en bas. La vapeur qui s'était introduite précédemment sous ce piston, et qui a déjà passé en partie dans le haut du cylindre D, presse le piston A de bas en haut, et le piston B de haut en bas : mais cette seconde pression l'emporte sur la première, parce que le piston B est plus large que l'autre : la différence de ces deux pressions s'ajoute à la pression que le piston A éprouve sur sa face supérieure, pour former la force totale qui tend à abaisser l'ensemble des deux pistons. Les pistons descendent sous l'action de cette force totale. Lorsqu'ils sont au bas de leur course, les robinets E, H, L, se ferment, les autres s'ouvrent : la vapeur de la chaudière se rend dans le bas du cylindre C ; celle qui était au haut de ce cylindre, passe au bas du cylindre D : et celle qui s'était rendue dans le haut du cylindre D s'échappe dans le condenseur. Les pistons remontent alors sous l'action d'une force égale à celle qui les avait fait descendre ; et ainsi de suite. Les divers robinets n'ont été mis ici que pour la facilité de l'explication ; en réalité on emploie des tiroirs, qui remplissent le même objet.

La force totale qui fait descendre ou monter l'ensemble des deux pistons est plus grande qu'elle ne le serait, si le cylindre C existait.

seul, et si la vapeur, après avoir agi dans ce cylindre, passe immédiatement dans le condenseur ; et cependant la quantité de vapeur dépensée pour chaque coup de piston serait la même. On voit donc que l'emploi d'un second cylindre occasionne un avantage marqué ; la même quantité de vapeur donne lieu à la production d'une plus grande quantité de travail. Cela tient à ce que la vapeur se détend en passant du cylindre C dans le cylindre D, et qu'elle ne se rend au condenseur qu'après qu'on a ainsi utilisé la détente.

§ 432. *Détente variable.* — Nous avons indiqué le moyen employé par Watt, pour faire varier l'action de la vapeur dans le cylindre, suivant que le mouvement de la machine s'accélère ou se ralentit, de manière à entretenir la vitesse de sa marche dans des limites convenables. Ce moyen, qui consiste dans l'emploi d'une soupape à gorge destinée à rétrécir plus ou moins le passage de la vapeur (§ 426, a l'inconvénient d'entraîner une perte de travail par la manière même dont il agit (§ 324. Aussi a-t-on cherché à lui en substituer un autre plus avantageux. C'est ce à quoi on est parvenu, en disposant l'appareil qui sert à la distribution de la vapeur de manière que la détente puisse se produire à volonté à un degré plus ou moins grand, c'est-à-dire que la vapeur puisse agir à pleine pression pendant une fraction plus ou moins grande de la course du piston, pour se détendre ensuite. On voit, en effet, que si, à chaque coup de piston, on laisse subsister pendant moins longtemps la communication de la chaudière avec le cylindre, on dépensera moins de vapeur, et le travail développé par l'action de la vapeur sur le piston sera diminué ; si, au contraire, on laisse agir la vapeur à pleine pression pendant une plus grande fraction de la course du piston, on dépensera plus de vapeur, et le travail appliqué à la machine sera plus grand. On comprend donc qu'on puisse, en faisant varier la détente, mettre constamment le travail moyen développé par l'action de la vapeur dans le cylindre en rapport avec la grandeur du travail résistant qui est appliqué à la machine, de manière à maintenir sa vitesse dans des limites convenables.

Nous n'entrerons pas dans la description des pièces qui permettent de faire varier la détente à volonté. Nous nous contenterons de dire que la variation de la détente est tantôt laissée à la volonté du mécanicien qui gouverne la machine, et tantôt produite par le régulateur à force centrifuge. Dans ce second cas, la machine se règle elle-même, et la détente varie suivant les besoins de la machine, sans que le mécanicien ait à s'en inquiéter.

§ 433. *Suppression du condenseur.* — L'emploi d'un condenseur

est indispensable qu'autant que l'on ne donne pas à la vapeur, la chaudière, une force élastique de plus d'une atmosphère. il n'en est plus de même lorsque la vapeur agit avec une élastique notablement supérieure à celle de l'air atmosphérique. Il suffit, en effet, dans ce cas, de mettre alternativement une des extrémités du cylindre en communication avec l'atmosphère, pendant que l'autre extrémité communique avec la chaudière, pour que le piston soit mis en mouvement par la différence des pressions qu'il supporte sur ses deux faces. Ainsi l'emploi d'un condenseur est facultatif, pour les machines à haute pression. On le supprime, ou on le conserve, suivant les conditions dans lesquelles on est placé. Si l'on a facilement à sa disposition une grande quantité d'eau pouvant servir à la condensation de la vapeur, on conserve cette condensation, parce qu'il en résulte un avantage sous le rapport du travail produit par une quantité donnée de vapeur : le travail qui se forme dans la partie du cylindre vers laquelle le piston se dirige occasionne une augmentation de travail moteur, qui n'est compensée par le travail résistant dû à la pompe à air et à la pompe à eau froide. Si, au contraire, on ne peut se procurer que difficilement l'eau nécessaire à la condensation, ou bien si l'objet que l'on veut remplir la machine exige qu'elle n'occupe que peu de place, on supprime le condenseur, et par suite la pompe à air, et la pompe à eau froide.

434. Avantage des machines à haute pression. — Cherchons à nous rendre compte de l'avantage que peut présenter l'emploi de la vapeur à haute pression ; et pour cela supposons d'abord qu'on ne la fasse pas agir avec détente. Si l'on donne à la vapeur une force élastique de 4 atmosphères, sa température sera de 144° , d'après le tableau de la page 642 : elle serait de 100° , si la force élastique était seulement de 1 atmosphère. En admettant qu'on puisse se appliquer ici les lois de Mariotte et de Gay-Lussac (§§ 249 et 250), on verra qu'un volume 1 de vapeur saturée à la température de 144° occupera un volume 4, si on le dilate, sans que sa température change, jusqu'à ce que sa force élastique devienne égale à une atmosphère ; et que son volume se réduira ensuite à 3,58, si l'on abaisse sa température à 100° , sans que sa force élastique cesse d'être d'une atmosphère. On peut donc dire que, si deux masses égales d'eau sont réduites en vapeur à saturation, l'une sous la pression de 4 atmosphères, l'autre sous la pression de 1 atmosphère, elles occuperont des volumes qui seront entre eux dans le rapport des nombres 4 et 3,58. Les cylindres de deux machines à vapeur, qui devront dépenser la même masse de vapeur pour chaque

coup de piston, en fonctionnant, l'une à 4 atmosphères, l'autre à 1 atmosphère, devront donc avoir des capacités proportionnelles à ces mêmes nombres 4 et 3,58 ; c'est-à-dire que, si les pistons parcourent le même chemin dans les deux machines, leurs surfaces devront être entre elles dans le même rapport que ces nombres. Mais la pression supportée par chaque centimètre carré de la surface du premier piston est quatre fois plus grande que celle que supporte chaque centimètre carré de la surface du second ; donc, en définitive, les pressions totales exercées par la vapeur sur les deux pistons seront entre elles comme les nombres 4 et 3,58. Les quantités de travail développées par la même masse d'eau réduite en vapeur, dans les deux machines, seront donc aussi entre elles comme ces nombres ; c'est-à-dire qu'il y a un peu plus de travail produit par la vapeur qui agit à 4 atmosphères que par celle qui agit à une atmosphère. Mais aussi on voit, par le tableau de la page 643, qu'il faut plus de chaleur pour réduire une masse d'eau en vapeur saturée sous la pression de 4 atmosphères que sous la pression d'une seule atmosphère. en sorte que, sous le point de vue économique, il serait à peu près indifférent de faire agir la vapeur à haute ou à basse pression.

D'après cela, les machines à haute pression, dans lesquelles la vapeur n'agit pas avec détente, ne présentent d'avantage réel que ce que la pression résistante, provenant de la vapeur qui s'échappe du cylindre pour se rendre, soit au condenseur, soit dans l'atmosphère, est d'autant plus faible que la surface du piston est plus petite ; et aussi en ce que le cylindre occupe moins de place qu'il ne devrait en occuper, si la vapeur était employée à basse pression.

Maïs, dans le cas où l'on utilise la détente de la vapeur, et c'est ce qu'on cherche toujours à faire maintenant, les machines à haute pression présentent un avantage très marqué, qui consiste en ce que la détente peut être produite dans une étendue beaucoup plus grande que dans les machines à basse pression.

Dans la plupart des machines à vapeur que l'on construit actuellement, la vapeur est employée avec une force élastique de 4, 5, et même 6 atmosphères ; on dépasse rarement cette limite.

§ 435. *Transmission du mouvement du piston à un arbre tournant.* — Dans la machine de Watt, le mouvement de va-et-vient du piston se transmet à un arbre tournant, par l'intermédiaire d'un balancier, d'une bielle et d'une manivelle. Souvent on supprime le balancier, et l'on réunit directement l'extrémité de la tige du piston à la bielle, fig. 514. Dans ce cas la tige a besoin d'être guidée

is son mouvement, pour qu'elle ne soit pas faussée par la résistance oblique qu'elle éprouve de la part de la bielle, tantôt dans un

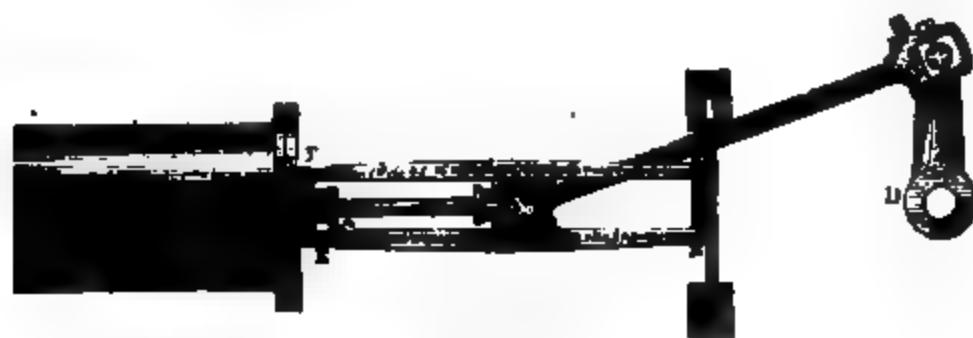


Fig. 511.

s, tantôt dans l'autre, suivant que la manivelle CD est placée d'un côté ou de l'autre de l'arbre. A cet effet, l'extrémité de la tige est munie de pièces spéciales, nommées *glissières*, placées de chaque côté de cette extrémité, et assujetties à glisser sur des guides fixes E, E, ou bien encore remplace ces glissières par des galets qui peuvent rouler sur les guides entre lesquels sont compris.

M. Cave a encore simplifié la transmission du mouvement du piston à l'arbre tournant, en supprimant la bielle, et articulant directement la tige du piston à la manivelle. Pour cela, il a fallu rendre le cylindre A mobile, *fig. 512*, afin que la tige B du piston pût être toujours dirigée suivant son axe, dans toutes les positions qu'elle prend, d'après sa liaison avec la manivelle D. Aussi le cylindre A est-il supporté par deux tourillons E, autour desquels il tourne oscillant, tantôt d'un côté, tantôt de l'autre : c'est ce qui a fait donner aux machines de ce genre le nom de *machines à cylindre oscillant*. Pour que le piston puisse toujours donner au cylindre la position convenable, on munit sa tige de deux galets F, F, qui s'appuient sur deux tringles fixées sur le fond du cylindre. Les tourillons E étant les seules parties du cylindre

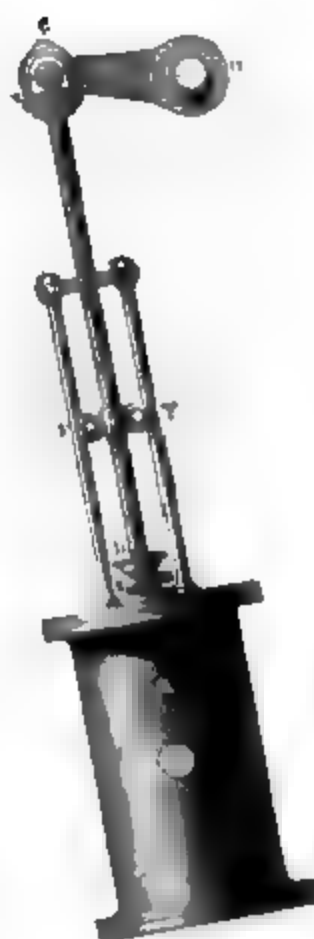


Fig. 512.

qui conservent la même position pendant le mouvement de la machine, c'est par l'intérieur de l'un d'eux que passe la vapeur qui vient de la chaudière, et par l'intérieur de l'autre que sort celle qui a cessé d'agir. L'appareil qui sert à la distribution de la vapeur est porté par le cylindre, et oscille avec lui.

§ 436. **Chaudières à vapeur.** — La production de la vapeur nécessaire à la marche des machines à vapeur s'effectue dans des chaudières auxquelles on donne des formes diverses. On voit par ce que nous avons dit relativement à l'invention des machines à vapeur (§§ 414 à 418), que les premières chaudières employées étaient sphériques, ou au moins formées d'une portion de sphère avec un fond plat. Cette forme, qui a dû naturellement se présenter tout d'abord, a le grave défaut de n'offrir qu'une faible surface pour une masse d'eau considérable, ce qui est peu favorable à la production de la vapeur. Aussi Watt a-t-il donné une disposition toute différente à ses chaudières. Il a adopté pour cela la forme d'un cylindre allongé dans le sens horizontal, et ayant pour section perpendiculaire à ses arêtes une courbe à parties rentrantes. Les chaudières de Watt pouvaient ainsi recevoir l'action directe de la flamme du foyer sur une surface beaucoup plus grande que les chaudières précédentes, à égalité de capacité intérieure.

La forme d'un cylindre allongé est celle qu'on adopte encore maintenant dans la construction des chaudières à vapeur. Mais on a dû modifier la section transversale du cylindre, en raison de la grandeur de la force élastique avec laquelle on fait ordinairement agir la vapeur. On conçoit, en effet, que si la chaudière présente des parties rentrantes, et que la pression exercée par la vapeur à son intérieur soit notablement supérieure à la pression atmosphérique, cet excès de pression tend à déformer la chaudière, en repoussant au dehors les parties rentrantes; les faces planes elles-mêmes, s'il y en a, doivent être rendues convexes par l'effet de cet excès de pression. Aussi, pour que les chaudières ne se déforment pas, et qu'elles résistent également bien partout à la pression intérieure, on leur donne la forme d'un cylindre allongé à base circulaire, et on les termine à leurs extrémités par des calottes sphériques, souvent même par des hémisphères. C'est ce que l'on voit sur les *fig. 513 et 514*, dont la première est une coupe longitudinale du fourneau, destinée à faire voir la chaudière dans le sens de sa longueur, et la seconde en est une coupe transversale. Au-dessous du corps A de la chaudière, on voit deux cylindres B, B, qui ont à peu près la même longueur qu'elle, et dont le diamètre est plus petit. Ces cylindres, auxquels on donne le nom de *bouilleurs*, com-

quent avec la chaudière A au moyen des tubulures C, C, et destinés à augmenter la surface de chauffe.

Le fourneau est construit de manière à obliger la flamme à venir heurter successivement les diverses parties de la surface de la chaudière. A cet effet, une cloison horizontale D règne dans toute

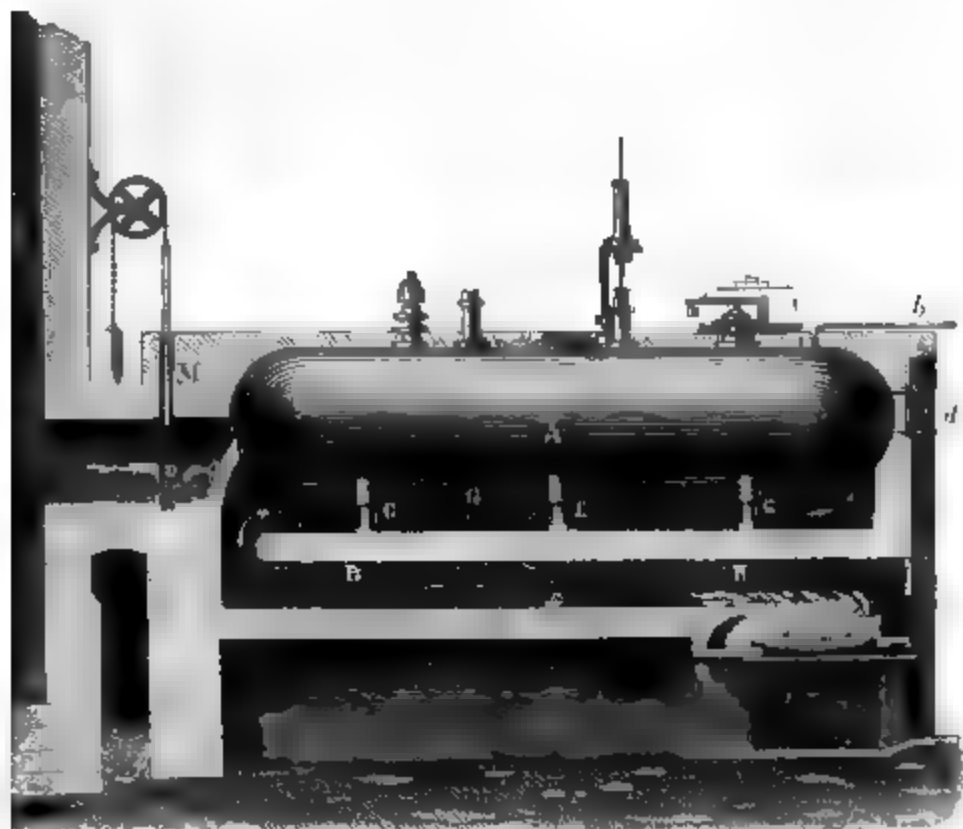


Fig. 613.

longueur, à la hauteur des bouillours; et deux cloisons verticales, passant par les tubulures C, C, divisent en trois compartiments l'espace qui reste libre entre cette cloison horizontale et la paroi inférieure du corps de la chaudière. La flamme, en sortant du foyer E, se rend d'abord dans le conduit F, qui la mène à l'extrémité postérieure de la chaudière, de là elle passe dans le compartiment G, et revient vers la partie antérieure, enfin, arrivée à l'extrémité du conduit G, elle se divise en deux, et retourne à la paroi postérieure de la chaudière en passant par les conduits latéraux H, H, auxquels on donne le nom de *carreaux*. A sa sortie des carreaux H, H, elle se rend dans la cheminée L. Un registre M, dont le poids est équilibré par un contre-poids, sert à fermer plus ou

poins le conduit qui relie les carnaux à la cheminée, afin le tirage.

Les chaudières à bouilleurs, construites en tôle, se que l'on emploie le plus en France, mais elles sont moins employées. Ainsi on trouve souvent des chaudières à bouilleurs; ou bien des chaudières avec un tuyau cylindrique traverse dans toute leur longueur, et au milieu de installé le foyer; ou bien encore des chaudières traversées plusieurs petits tuyaux parallèles, dans lesquels passe la flamme. Dans tous les cas, quel que soit le système de la chaudière

employée, il faut faire en sorte que la surface de chauffe ait une étendue proportionnée à la quantité de vapeur être produite dans un temps donné. L'expérience a fait voir que cette surface doit être d'au moins 4 m² par force de cheval de la machine; même il serait convenable de la porter à 5 m².

Un tuyau, que l'on voit en *a*, part de la paroi supérieure de la chaudière, et sert à conduire la vapeur à la machine. Un second tuyau *b*, sert à l'alimentation de la chaudière, à-dire à l'introduction de l'eau pour remplacer celle qui s'en va sous forme de vapeur; ce tuyau plonge dans la chaudière, et vient déboucher au fond de l'eau qu'elle contient.

§ 437. Depuis que la vapeur est employée comme moteur, on a eu à subir un grand nombre de malheurs, à cause de l'explosion des chaudières. Aussi s'est-on préoccupé de trouver des moyens convenables pour prévenir

tour de semblables malheurs. Avant de faire connaître ces moyens auxquels on s'est arrêté, nous indiquerons d'abord les principales causes des explosions des chaudières.

Une première cause d'explosion, celle que l'on avait tout d'abord comme en étant la cause unique, consistait dans le défaut de solidité de la chaudière. Si l'on augmente proportionnellement la tension de la vapeur à l'intérieur d'une chaudière

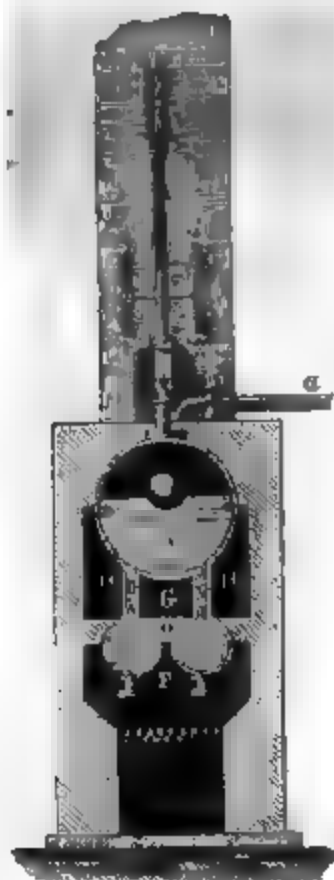


Fig. 514.

it qu'il arrivera un moment où les parois ne seront plus capables de résister à sa force expansive, et elles se déchireront pour lui faire passage au dehors. Supposons donc qu'une chaudière soit assez peu solide pour que cette limite de résistance, qu'elle ne peut pas dépasser, corresponde à une tension que la vapeur puisse prendre pendant la marche de la machine ; il en résultera nécessairement une explosion.

Mais il est très rare que les choses se passent ainsi. Le plus habituellement les explosions sont dues à ce que certaines parties des parois de la chaudière se trouvent portées accidentellement à une température très élevée, et sont mises ensuite rapidement en contact avec une certaine quantité d'eau. On conçoit, en effet, que ces circonstances peuvent occasionner une explosion, par deux causes différentes. En premier lieu, l'eau qui vient à toucher des parois rougies par l'action du feu, doit se vaporiser rapidement, ce qui détermine une augmentation brusque de la pression à l'intérieur de la chaudière. En second lieu, le refroidissement presque instantané, qu'éprouvent ces parois rougies de la chaudière, amène une modification dans leur constitution moléculaire, et facilite beaucoup leur déchirure sous l'action de la pression intérieure.

Tant que la portion des parois d'une chaudière qui est en contact avec la flamme au dehors reste baignée par l'eau au dedans, il n'y a pas à craindre que les effets dont nous venons de parler se produisent. Mais il n'en sera plus de même si le niveau de l'eau baisse à l'intérieur, au-dessous des points les plus élevés des carneaux dans lesquels la flamme circule. On voit que, dans ce cas, les parties de la paroi de la chaudière qui sont situées entre le niveau de l'eau et le haut des carneaux peuvent être facilement rougies : et si l'eau se trouve projetée sur ces parois rouges, par suite du bouillonnement qui accompagne l'ébullition, il pourra en résulter une explosion.

L'eau employée à l'alimentation d'une chaudière y dépose souvent des matières solides, qui forment un encroûtement de plus en plus épais. Les parois inférieures de la chaudière, n'étant plus en contact direct avec l'eau, peuvent prendre une température beaucoup plus élevée que si ce dépôt n'existait pas. Si ensuite, par une cause quelconque, il vient à se produire quelque fissure dans cet encroûtement, l'eau s'y infiltre, se transforme en vapeur au contact de parties plus chaudes, et, soulevant ainsi le dépôt, met à nu une étendue plus ou moins grande de la paroi qu'il recouvrait. Souvent ces explosions se sont produites dans ces circonstances.

Les explosions des chaudières à vapeur sont habituellement

accompagnées d'effets mécaniques extraordinaires, tels que la projection de pièces d'un grand poids à une distance énorme. On aura peine à se rendre compte de ces effets, si l'on cherchait à les expliquer par l'action de la vapeur qui existait dans la chambre au moment de l'explosion, lors même qu'on attribuerait à cette vapeur une tension considérable. Mais il faut observer que la masse d'eau contenue dans la chaudière, étant brusquement mise en communication avec l'atmosphère, et ayant une température très notablement supérieure à 400° , doit se vaporiser en grande partie, et donner lieu presque instantanément à la production d'une quantité de vapeur extrêmement grande. C'est cette vapeur, formée au moment même de l'explosion, qui occasionne les effets extraordinaires que l'on observe.

§ 438. Voyons maintenant quelles sont les mesures que l'on a adoptées pour s'opposer à ce que les circonstances que nous venons de signaler puissent se présenter.

Pour qu'une chaudière à vapeur puisse être employée en France, il faut qu'elle porte un timbre qui indique le nombre d'atmosphères que la tension de la vapeur à son intérieur ne doit pas dépasser. Ce timbre est poinçonné par l'administration, après qu'on a fait subir à la chaudière une épreuve, qui consiste à la remplir d'eau, et à exercer sur cette eau, au moyen d'une pompe foulante, une pression triple de celle que le timbre indique.

Pour que la tension de la vapeur, dans la chaudière, ne puisse pas dépasser la limite pour laquelle la chaudière a été éprouvée, on lui adapte deux soupapes de sûreté, une à chacune de ses extrémités. La *fig. 545* en montre la disposition. La soupape A est placée

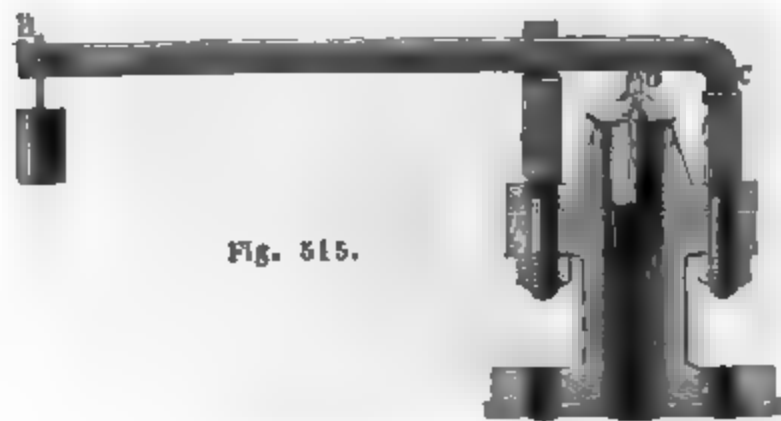


Fig. 545.

à l'extrémité d'un tuyau vertical qui communique inférieurement avec la chaudière. Un levier BC, mobile autour du point C, s'app-

tête de la soupape. Un poids est suspendu à l'extré-
vier ; il y a été choisi de manière à exercer sur la
pression égale à celle qu'elle éprouverait de bas en
le la vapeur, si sa force élastique atteignait la valeur
pas dépasser. La *fig. 516* montre la soupape seule,
n est une coupe horizontale, destinée
ndre la disposition de la partie qui
tuyan qu'elle doit fermer. Cette partie
soupape est formée de trois ailettes,
aider dans son mouvement, lorsqu'elle
r un excès de tension intérieure, et
ées de manière à s'opposer aussi peu
a sortie de la vapeur.

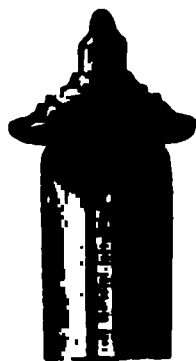


Fig. 516.

important que le chauffeur puisse con-
instant la force élastique de la va-
active le feu plus ou moins, de ma-
ir cette force élastique dans des limites
cet effet on adapte à la chaudière un
il communique constamment avec son
se sert souvent pour cela d'un mano-
mprimé, *fig. 518*, dont nous avons
cipe précédemment (§ 264). La va-
a, et vient exercer sa pression sur le
u dans un vase *b*, où plonge un tube
tenant de l'air, et fermé par le haut.
érieure de la colonne de mercure, dans
e, indique la force élastique de la va-
hères, d'après la position qu'elle occupe
on qui accompagne ce tube.



Fig. 517.

is que la tension de la vapeur ne doit
atmosphères, le manomètre à air com-
e remplacé par un manomètre à air
e manomètre, dont les indications sont
que celles du précédent, présente un
sez grave ; la grande longueur de tube
de la colonne de mercure doit par-
que la pression est de 2, 3, 4 atmos-
que cette extrémité est souvent mal
l'on puisse la voir facilement. Pour
convénient, on adopte quelquefois la
a *fig. 519*. La vapeur, qui arrive en *a*, exerce sa
mercure du vase *b*, et le fait monter dans le tube



Fig. 518.



Fig. 519.



Fig. 520.

ce, qui est ouvert par le haut; un fil-
teur d'appuie constamment sur le som-
met de la colonne de mercure, et est
suspendu à un fil, qui passe sur une
poulie, et qui supporte un contre-poids
à son autre extrémité. Les mouvements
de la colonne de mercure sont indiqués
par ce contre-poids, qui se meut en sens
contraire, et que l'on aperçoit très faci-
lement.

La fig. 520 montre une autre dispo-
sition du manomètre à air libre, dans
laquelle l'extrémité supérieure de la co-
lonne de mercure se meut dans une
étendue beaucoup moins grande. La va-
peur de la chaudière arrive en *a*, et com-
munique librement avec l'intérieur d'une
capacité *b*. Du bas de cette capacité
part un tube métallique *cc*, qui descend
d'abord, se recourbe ensuite pour remon-
ter suivant *dd*, et vient aboutir à un tube
de verre *e* qui est beaucoup plus large.
Du haut de ce tube de verre part un
tube *f* qui vient pénétrer dans un vase
g, sans toucher les bords de l'ouverture
par laquelle il entre à son intérieur. Le
mercure se trouve dans le tube recourbé
cd, il descend en *c* sous l'action de la
vapeur, et monte en même temps en *d*,
jusque dans le tube de verre *e*, où il
éprouve la pression de l'air atmosphé-
rique, qui pénètre librement par le tube
f. C'est la différence de niveau du liquide
dans ces deux branches qui sert de me-
sure à l'excès de la pression de la va-
peur sur celle de l'atmosphère. Or, à
cause de la différence de diamètre des
tubes *c*, *e*, une grande dépression dans
le premier n'entraîne qu'une faible éle-
vation dans le second; il en résulte que
le chemin parcouru par la surface du
mercure en *e* est très petit, lors même

que la pression de la vapeur varie beaucoup. Le vase *g*, dans lequel débouche le tube *f*, est destiné à recueillir le mercure, dans le cas où un excès de pression dans la chaudière le ferait sortir du tube recourbé *cd*.

Tout récemment, M. Bourdon a imaginé un manomètre métallique, qui remplace avec avantage les manomètres à mercure. La pièce principale de ce manomètre consiste en un tuyau courbe de cuivre *B*, *fig.* 521, à l'intérieur duquel on fait agir la pression de la vapeur. L'une des extrémités de ce tuyau est fixée au point où aboutit le tuyau *A*, par lequel arrive la vapeur qui vient de la chaudière; et d'ailleurs il n'est attaché à la boîte qui le contient par aucun autre point. Son extrémité *C* est fermée. Sa section transversale n'est pas un cercle, mais une courbe très aplatie, comme le montre la *fig.* 522, qui en donne les dimensions en vraie grandeur. Lorsque la vapeur de la chaudière communique avec l'intérieur du tuyau *B*, la pression qu'elle exerce contre ses parois le gonfle un peu en diminuant l'aplatissement de sa section transversale, ce léger gonflement entraîne un changement dans la courbure du tuyau, qui tend à se redresser de plus en plus, à mesure que la pression intérieure augmente. Il en résulte que l'extrémité *C* se déplace, et fait mouvoir une aiguille *DEF*, à laquelle elle est liée par la tige *CD*. Cette aiguille, mobile autour du point *E*, aboutit par son extrémité *F* à divers points d'un arc divisé, dont la graduation a été faite de manière à indiquer la pression en atmosphères, d'après la position de l'aiguille. Le manomètre métallique de M. Bourdon est beaucoup plus commode que les précédents, dont les tubes de verre se brisent facilement, et occasionnent la perte du mercure; mais on a besoin de s'assurer de temps en temps si les indications qu'il fournit ne cessent pas d'être exactes, par suite des modifications lentes qui pourraient survenir dans l'état moléculaire



Fig. 521.



Fig. 522.

du tuyau courbe, sous l'action prolongée de la pression qui s'exerce à son intérieur.

§ 440. D'après ce que nous avons dit sur les causes d'explosion des chaudières (§ 437), on doit surtout éviter que certaines parties des parois se trouvent en contact avec la flamme au dehors, ou être mouillées par l'eau en dedans, soit en raison des encroûtements qui résultent des matières solides déposées par l'eau, soit par suite d'un trop grand abaissement du niveau de l'eau dans la chaudière.

On se met à l'abri de la première de ces deux causes d'accidents, en nettoyant souvent l'intérieur de la chaudière. On emploie aussi quelquefois un moyen particulier, qui consiste à introduire dans la chaudière des substances diverses, suivant la nature du dépôt formé par les eaux, afin que ce dépôt ne se durcisse pas, et reste à l'état pulvérulent.

Quant à la position du niveau de l'eau dans la chaudière, elle doit être l'objet d'une surveillance continuelle de la part du chauffeur; et c'est pour cela qu'on met à sa disposition des appareils destinés à la lui indiquer à chaque instant. Parmi ces appareils, nous citerons d'abord le flotteur *c*, *fig. 544* (page 660) qui monte et descend en même temps que le niveau de l'eau, et dont le mouvement est rendu sensible au dehors, par une tige déliée qui le surmonte verticalement et qui traverse la paroi de la chaudière. On emploie aussi deux robinets, qui sont adaptés à la chaudière en des points peu éloignés de la position que doit avoir constamment le niveau de l'eau, et situés l'un au-dessus, l'autre au-dessous de ce niveau; en ouvrant successivement ces deux robinets, on doit voir sortir de l'eau par le plus bas des deux, et de la vapeur par l'autre. Un troisième moyen, qui est excellent pour constater la position du niveau de l'eau dans la chaudière, consiste à adapter à sa partie antérieure un tube de verre *d*, *fig. 543* (page 659), qui communique par ses deux extrémités avec l'intérieur, et qui est placé de manière que le niveau de l'eau doive toujours correspondre à peu près au milieu de sa longueur: l'eau se rend librement dans ce tube par le bas, et y prend le même niveau que dans la chaudière, ce qui permet de voir à chaque instant la position qu'occupe ce niveau.

Les moyens que nous venons d'énumérer ne peuvent servir à prévenir un abaissement de niveau dans la chaudière, qu'autant que le chauffeur y fait attention; ils sont souvent inefficaces, en raison de la négligence de cet ouvrier. Aussi a-t-on imaginé un appareil qui a pour objet d'appeler son attention, dans le cas où le

le l'eau éprouverait un trop grand abaissement. Cet appareil, nommé *flotteur d'alarme*, est représenté par la fig. 523. Il contient un flotteur A, fixé à l'extrémité d'un levier ABC, qui a un contre-poids C à son autre extrémité. Tant que le niveau

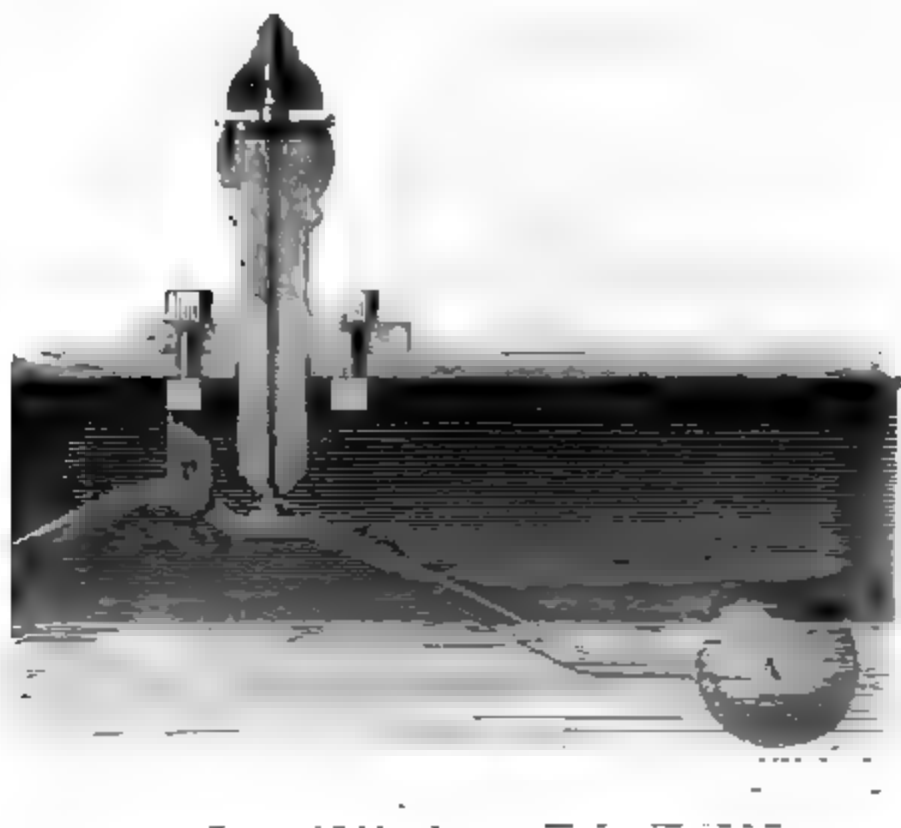


Fig. 523.

élevé dans la chaudière, le flotteur A est poussé de bas en haut. La pièce conique *a*, portée par le levier, se trouve ainsi appuyée contre l'orifice du tuyau vertical *b*, et ferme cet orifice. Mais si le niveau vient à baisser plus qu'il ne faut, le flotteur A s'abaisse avec lui, le bouchon conique ne plus le tuyau *b*, et la vapeur passe dans ce tuyau, pour sortir par l'ouverture annulaire *cc*. Le jet de vapeur, qui sort sous la forme de lame circulaire, vient rencontrer le timbre *d* en vibration, sur tout son contour : le timbre se met en vibration, et il en résulte un sifflement aigu que tout le monde connaît, pour servir d'avertissement aux conducteurs des locomotives des chemins de fer, dont les machines sont disposées de la même manière.

Indicateur de Watt. — La connaissance de la force élastique de la vapeur dans la chaudière, qui est fournie par les indi-

EMPLOI DE LA VAPEUR COMME MOTEUR

Le manomètre, ne suffit pas pour qu'on puisse exa-
miner le développement de la vapeur sur le piston car la
élasticité de la vapeur est ordinairement plus faible dans le
cylindre que dans la chaudière, à cause des résistances qu'elle
surmonte toujours en allant de l'une à l'autre. D'un autre côté, l'indica-
teur ne fait agir la vapeur avec détente, il n'y a plus de commu-
nication entre le cylindre

et la chaudière, et par consé-
quent le manomètre ne
peut nullement faire con-
naître ce qui se passe dans
le cylindre. C'est pour ces
motifs que, lorsqu'on veut
se rendre compte de la pres-
sion d'une machine à va-
peur, on adapte au cylindre
un instrument spécial
destiné à faire connaître
à tout instant la tension de la vapeur à
l'intérieur. Cet instru-
ment, dû à Watt, est dési-
gné sous le nom d'indicateur
Watt.

Il se compose d'un
cylindre A, fig. 521, et
dans lequel se trouve un
petit piston, dont la tige
saillante à son extrémité
est garnie d'un petit
cylindre est garni d'un
vis à sa partie inférieure
de manière à pouvoir
fixer dans une tige
tarabulée que l'on fixe
dans l'un des fondements
du cylindre de la machine.
Lorsque l'indicateur est
ainsi installé, la tige
agit dans la machine
en commun avec l'indicateur
cylindre A, et

la pression plus ou moins grande sur le petit piston qu'il
piston cède à l'action de cette pression, et le ressort

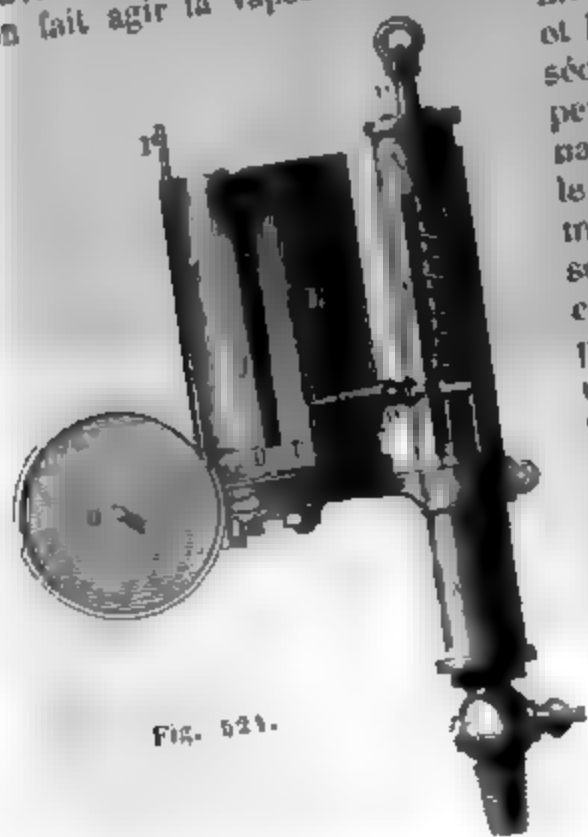


Fig. 521.

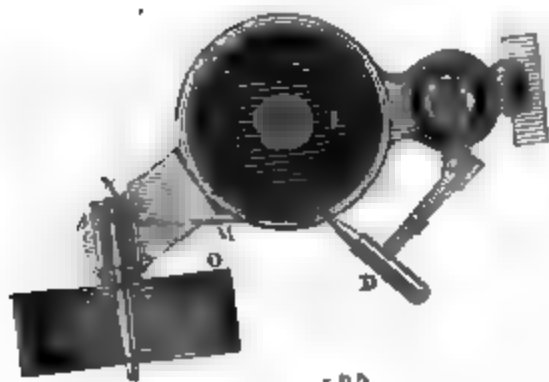


Fig. 522.

entoure sa tige, se comprime d'autant plus que la force élastique de la vapeur est plus grande. Un index, que porte la tige du piston, vient ainsi correspondre à un des points d'une échelle lue que porte le cylindre A, et peut faire connaître la tension à vapeur.

Mais la rapidité du mouvement de la machine, jointe à la variation qu'éprouve la tension de la vapeur pendant une seule course du piston moteur, fait que l'indicateur serait d'un emploi difficile, se réduisant à ce que nous venons de dire. Pour qu'il puisse être employé plus facilement, et fournir en même temps des indications plus précises, on a adapté à la tige B du petit piston un crayon D, qui est destiné à imprimer sa trace sur une bande de papier enroulée autour du cylindre E. Cette bande est tendue sur la surface du cylindre, et ses deux extrémités y sont maintenues par les deux lames de ressort *d*, sous lesquelles elles se trouvent engagées. Pendant que le piston de la machine à vapeur marche, le cylindre E reçoit un mouvement de rotation autour de son axe, et vient ainsi présenter les diverses parties de la bande de papier à la pointe du crayon. Le mouvement est donné au cylindre E par la machine même. A cet effet, une petite corde P, dont l'extrémité supérieure est attachée en un point de la tige du piston de la machine à vapeur, fait plusieurs tours sur la surface d'un tambour O. L'axe de ce tambour porte en arrière un petit treuil N, sur lequel s'enroule une seconde corde M, qui embrasse la gorge d'une sorte de poulie adaptée au bas du cylindre E, et dont l'extrémité est fixée en un point de cette gorge. Lorsque le piston de la machine à vapeur marche dans un certain sens, il tire la corde P, cette corde fait tourner le tambour O, en se déroulant. la corde M s'enroule sur le treuil N, et fait ainsi tourner le cylindre E. Lorsque le piston de la machine à vapeur marche en sens contraire, les diverses pièces reviennent à leur position primitive, par suite de l'action d'un ressort contenu à l'intérieur du cylindre E. En

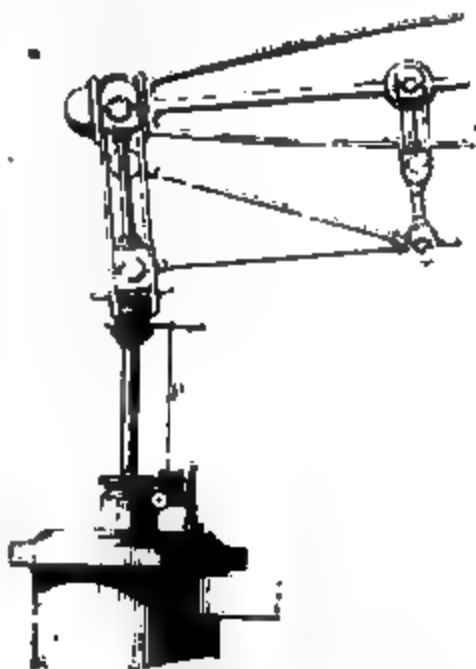


Fig. 526.

sorte que la bande de papier, sur laquelle s'appuie la pointe du crayon, est animée d'un mouvement de rotation alternatif, déterminé par le mouvement alternatif du piston de la machine à vapeur. La fig. 526 montre la disposition de l'indicateur, sur le fond supérieur du cylindre d'une machine à cylindre vertical et à balancier.

Pendant que le cylindre B amène successivement les deux parties du papier qui le recouvre, sous la pointe du crayon B, celui-ci marche plus ou moins dans le sens de la longueur du cylindre A, suivant les variations de la force élastique de la vapeur. Il en résulte que le crayon trace sur le papier une ligne courbe, dont la forme dépend à la fois de ces deux mouvements, et dont la considération peut conduire à la connaissance des changements qui sont survenus successivement dans la force élastique de la vapeur. On voit ici, fig. 527, une courbe ainsi obtenue à l'aide de



Fig. 527.

l'indicateur de Watt. La partie ABCD a été tracée par le crayon pendant que le piston moteur descendait sous l'action de la vapeur; la partie DEF a été tracée pendant que le piston remontait. La ligne GH est celle que la

pointe du crayon aurait parcourue, si le vide parfait avait existé dans la partie du cylindre qui était en communication avec l'indicateur. La perpendiculaire CK, abaissée d'un point quelconque C de la courbe sur cette ligne droite GH, mesure donc la quantité dont le petit piston de l'indicateur était repoussé par la pression de la vapeur, au moment où le crayon a marqué le point C; et par suite on peut en conclure la force élastique de la vapeur à ce moment, d'après les expériences faites préalablement, pour graduer l'échelle de l'indicateur. La ligne droite LM est celle qu'aurait tracée le crayon, si la tension de la vapeur eût constamment égalé celle de l'air atmosphérique, c'est-à-dire si le ressort en hélice de l'indicateur n'eût pas été tendu pendant le temps de l'expérience. La partie AB de la courbe correspond au temps pendant lequel la vapeur a agi à pleine pression. On voit qu'ensuite elle a agi avec détente, et que sa force élastique s'est ainsi abaissée au-dessous de celle de l'air atmosphérique. La seconde partie DEF a été tracée lorsque la partie du cylindre à laquelle l'indicateur était appliqué communiquait avec le condenseur.

tout le temps que cette communication a existé, la pression par l'indicateur est restée constante et inférieure à l'atmosphère, excepté vers la fin, où elle a augmenté par la suppression anticipée de cette communication.

Il est évident que la courbe fournie par l'indicateur de Watt permet de faire des modifications que subit successivement la tension de la vapeur dans le cylindre d'une machine, mais elle peut encore, tracée qu'elle occupe sur la feuille de papier, faire connaître la valeur numérique du travail total développé par l'action de la vapeur pendant chaque course du piston. Nous nous contentons de signaler cette utilité du tracé que donne l'indicateur, sans entrer dans aucun détail à ce sujet, ce qui nous entraînerait beaucoup trop loin.

Détails économiques sur l'emploi de la vapeur dans le moteur. — Les combustibles employés pour le chauffage des chaudières à vapeur sont habituellement la houille ou le coke. Il résulte des expériences auxquelles on les a soumis, que la combustion d'une livre de houille développe environ 7500 unités de chaleur, et qu'un kilogramme de coke en développe environ 6000. Dans les tableaux des pages 612 et 613, on voit que la quantité de combustible nécessaire pour transformer un kilogramme d'eau en vapeur saturée ayant une force élastique de 4 à 6 atmosphères peut être évaluée approximativement à 650 unités de chaleur. Il suit de là que, si toute la chaleur développée par la combustion est uniquement employée à la formation de la vapeur, un kilogramme de houille produirait 14^k,5 de vapeur; et un kilogramme de coke produirait 9^k,2. Mais il n'est pas possible d'utiliser ainsi toute la chaleur développée. D'une part, les gaz qui résultent de la combustion même, et qui se dégagent par la cheminée, emportent avec eux une température assez élevée, et entraînent avec eux une fraction notable de la chaleur produite. D'une autre part, il arrive dans le foyer pour entretenir la combustion une grande quantité d'azote: et de plus une portion seulement de la chaleur est réellement employée: en sorte qu'une masse considérable de gaz inutile passe dans le foyer, se mêle aux produits de la combustion, et absorbe ainsi une autre portion de la chaleur développée. Si l'on joint à cela que la combustion est rarement complète dans les fourneaux des chaudières à vapeur, et que la chaleur se perd en partie, tant par le rayonnement extérieur que par la transmission de proche en proche dans la masse du fourneau, il est évident que dans la réalité on doit être loin d'obtenir les résultats précédemment indiqués. L'expérience montre en effet que, dans les

EMPLOI DE LA VAPEUR COMME MOTEUR.

Les mieux construits, le poids de l'eau vaporisée par kilogramme de houille est seulement de 7 à 8 kilogrammes.

En appliquant le frein dynamométrique (§ 499) à l'arbre auquel une machine à vapeur communique un mouvement de rotation afin de déterminer la quantité de travail que la machine est capable de produire, on a trouvé que, dans les bonnes machines à double et à condensation, 1 kilogramme de vapeur fournit environ 10 kilogrammètres de travail utile. Et si l'on tient compte de ce qu'un kilogramme de houille, on verra que la consommation de combustible, par force de cheval et par heure, est d'environ § 443. Pour attendre les résultats qui viennent d'être énoncés, il est nécessaire d'employer tous les moyens possibles pour poser à la condensation de la vapeur, depuis le moment où elle sort de la chaudière, jusqu'au moment où elle est enveloppée d'agir dans la machine. A cet effet, le tuyau vapeur de la chaudière, telles que des nattes de papier ou mieux encore de la laine. Il faut aussi que le cylindre de lui un second cylindre de dimensions un peu plus grandes, espèce auquel on donne le nom de chaudière circulaire, pour être remplacé avec avantage par un autre cylindre de bois.

Si la température du cylindre d'une machine est élevée, par l'emploi de moyen plus grande qu'on ne pourrait le croire, blerait en effet qu'il ne doit y avoir qu'un peu de condensation pour restituer au cylindre la quantité de chaleur perdue. En effet, lorsqu'on se chauffe, elle se condense dans le cylindre, elle se condense la température des parois avec l'eau jusqu'à ce qu'elle ait complètement communiqué avec le condenseur, et l'eau pure se

luit dans le cylindre même, en refroidit les parois; et lorsque de nouvelle vapeur vient de la chaudière, elle donne lieu à la reproduction des mêmes circonstances. On conçoit dès lors combien il est important de s'opposer au refroidissement du cylindre par le rayonnement extérieur, puisque c'est une des causes de ces condensations et vaporisations successives à son intérieur.

Lorsque le tuyau qui amène la vapeur de la chaudière à la machine la prend à peu de distance de la surface du liquide en ébullition, elle contient de l'eau en suspension, qui est ainsi entraînée jusque dans le cylindre. Cette eau occasionne une perte notable, non seulement parce que la chaleur qui a servi à élever sa température ne produit aucun effet, mais surtout parce qu'étant arrivée dans le cylindre, elle s'y vaporise comme on vient de l'expliquer, et y produit un abaissement notable de la température des parois. Aussi doit-on faire en sorte que la prise de vapeur, dans la chaudière, se fasse de manière à éviter cette circonstance défavorable. On y arrive en surmontant la chaudière d'une capacité dans laquelle la vapeur s'accumule, et en faisant partir le tuyau du haut de ce réservoir de vapeur. Par ce moyen, l'eau contenue en suspension dans la vapeur se dépose peu à peu en retombant dans la chaudière; et la vapeur qui se trouve dans le haut du réservoir en est à peu près complètement débarrassée.

§ 444. **Machine à vapeurs combinées.** — On n'utilise en réalité, dans les machines à vapeur, qu'une très petite portion de la chaleur employée à la production de la vapeur. On voit, en effet, qu'au moment où la vapeur cesse d'agir dans le cylindre, et où on la fait communiquer, soit avec le condenseur, soit avec l'atmosphère, elle contient encore une quantité de chaleur considérable, dont la plus grande partie est à l'état latent. On a eu l'idée d'utiliser cette chaleur en l'employant à la vaporisation d'un liquide plus volatil que l'eau, de manière à faire servir la vapeur de ce liquide à la production d'une nouvelle quantité de travail. On a pris successivement pour ce second liquide, de l'éther, du sulfure de carbone, du perchlorure de carbone, et du chloroforme; c'est à ce dernier qu'on s'est arrêté.

Les machines construites d'après cette idée sont mises en mouvement à la fois par la vapeur d'eau et par la vapeur de chloroforme: on les désigne sous le nom de *machines à vapeurs combinées*. Deux pistons séparés se meuvent chacun dans un cylindre, et reçoivent, l'un l'action de la vapeur d'eau, l'autre celle de la vapeur de chloroforme: ces deux pistons sont employés simultanément pour agir sur un même arbre tournant. Lorsque la vapeur d'eau a cessé

EMPLOI DE LA VAPEUR COMME MOTEUR.

Le cylindre qui lui est destiné, elle se rend dans un état où elle se condense par le contact de vases spéciaux construits en chloroforme. Ce liquide se vaporise en même temps, et ayant une force élastique assez grande, vient agir dans le cylindre, pendant que de nouvelle vapeur d'eau agit dans le même. Enfin la vapeur de chloroforme, après avoir exercé son action, passe dans une capacité où elle est condensée par l'eau froide qui rafraîchit constamment les parois extérieures des cylindres qui la contiennent.

Il est bien clair que l'emploi simultané de la vapeur d'eau et de la vapeur d'un liquide plus volatil doit amener une grande économie de combustible. Mais cette économie est accompagnée d'une perte d'une partie du liquide volatil que l'on emploie, perte qui peut rendre assez faible, mais qu'on ne peut pas éviter complètement, et qui a une importance d'autant plus grande que le combustible est plus cher. Il paraît cependant que les machines combinées que l'on a employées jusqu'à présent ont donné de bons résultats, au point de vue économique.

§ 443 **Machine à air chaud d'Ericsson.** — dont nous venons de parler, pour utiliser une partie de la vapeur renfermée surtout à l'état latent, lorsqu'elle agit dans une machine à vapeur, ne remède que l'économie du paragraphe précédent. Aussi a-t-on cherché des moyens pour éviter cette perte.

On a pensé avec raison depuis longtemps qu'il y avait une manière d'y arriver consisterait à substituer l'air d'eau. On comprend, en effet, que si l'on peut élever la température de la même manière qu'on élève celle de la machine, et ensuite faire agir l'air dans la machine disposée de la même manière qu'on dispose l'eau, on ne laissera échapper dans l'atmosphère aucune chaleur. On voit que l'action du piston de la machine, au lieu de produire une chaleur qui se perd, sera une fraction de la chaleur totale que l'on aura dépensée pour produire la vapeur, et qui est emportée par la vapeur, et qui est emportée par la vapeur, sans qu'il en résulte la moindre perte.

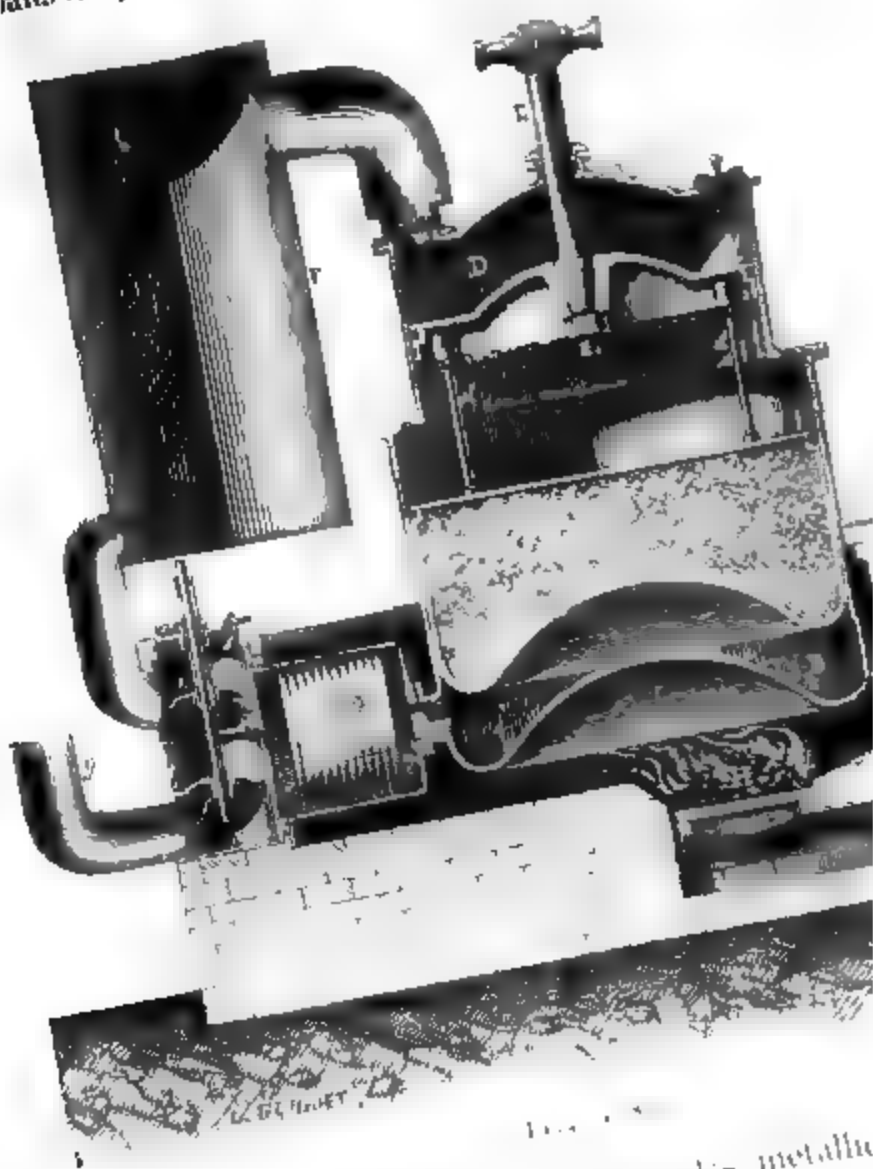
Cependant on n'était pas parvenu jusqu'à ces derniers temps à réaliser une machine à air chaud qui pût lutter avantageusement avec les machines à vapeur. La principale difficulté consistait en ce que, si l'on ne voulait pas élever beaucoup la température de l'air, on se trouvait obligé de donner à la machine des dimensions incomparablement plus grandes que celles d'une machine à vapeur de même force; et que d'un autre côté, si, pour diminuer ces dimensions, on se décidait à porter l'air à une température très élevée, il en résultait des inconvénients d'un autre genre, et en particulier une perte de chaleur comparable à celle qu'occasionnent les machines à vapeur. M. Ericsson vient de lever ces difficultés d'une manière très heureuse, en adoptant une disposition particulière que nous allons faire connaître.

Lorsque l'air chaud a cessé d'agir dans la machine, et qu'on le laisse s'échapper dans l'atmosphère, il emporte avec lui une grande partie de la chaleur qui lui a été donnée tout d'abord. Si l'on pouvait lui reprendre cette chaleur pour la faire servir à l'échauffement d'une nouvelle quantité d'air, il est clair que l'on aurait obvié à l'inconvénient principal des machines à feu, c'est-à-dire à la perte d'une portion considérable de la chaleur dépensée. Or, c'est précisément là ce que fait M. Ericsson. Dans la machine qu'il a imaginée, l'air chaud sort du cylindre pour se rendre dans l'atmosphère, en traversant un grand nombre de toiles métalliques: cet air se trouve ainsi en contact avec une très grande surface du métal qui forme ces toiles, et lui abandonne la presque totalité de l'excès de chaleur qu'il renferme. Ensuite, lorsqu'une nouvelle quantité d'air doit arriver dans le cylindre de la machine, après avoir été préalablement chauffé, cet air traverse d'abord les mêmes toiles métalliques, qui lui restituent la chaleur enlevée à l'air sortant; et il suffit de lui donner en outre une faible augmentation de température, en le soumettant à l'influence d'un foyer, pour qu'il puisse agir convenablement sur le piston de la machine.

La fig. 528 représente une des machines construites par M. Ericsson, d'après le système que nous venons d'indiquer: cette machine fonctionne dans un des ateliers de New-York. Un piston A se meut dans un cylindre B, qui communique librement avec l'atmosphère par les ouvertures *a, a*. Un second piston C, lié invariablement au premier par les tiges de fer *d, d*, et d'un diamètre notablement plus petit, se meut en même temps dans un cylindre D qui surmonte le cylindre B; la partie du cylindre D qui se trouve au-dessous du piston C communique également avec l'atmosphère par les ouvertures *a, a*. Le piston C est muni d'une tige E. qui tra-

EMPLOI DE LA VAPEUR COMME MOTEUR.

al supérieur du cylindre D, et va s'articuler à l'une des
d'un balancier qui n'est pas représenté ici. Un réservoir
e F est installé à côté des cylindres B, D, et est destiné
et avec l'air comprimé. Le haut du cylindre D communique
une autre part avec le réservoir F par la soupape e s'ouvrant de haut en
bas en haut. L'air contenu dans le réservoir F peut se
dans le cylindre B, en traversant l'ouverture de la soupape.



ainsi que les faces G contenant les tôles métalliques
avons parlé. La soupape e étant fermée, et la
ouverte, l'air contenu dans le réservoir F peut se

osphère en traversant les toiles métalliques G, l'ouverture de la soupape *f*, et le tuyau de dégagement *g*. Un foyer H est installé sous le fond du cylindre B, et la flamme qui s'en échappe circule dans un espace vide ménagé autour de la partie inférieure de ce cylindre, avant de se rendre dans la cheminée. Le piston A présente une assez grande épaisseur, et est rempli à son intérieur d'un mélange d'argile et de charbon en poudre, pour éviter que la chaleur ne se perde en le traversant.

Voici maintenant comment la machine fonctionne. La soupape *b* est ouverte, et la soupape *f* fermée, l'air comprimé du réservoir F se rend dans le cylindre B, en traversant les toiles métalliques G. L'air s'échauffe d'abord par le contact des fils qui composent ces toiles, et ensuite par l'action du foyer H, qui se transmet à lui par l'intermédiaire des parois du cylindre B. Le piston A monte sous la pression qu'il éprouve de la part de cet air, dont la force élastique est supérieure à celle de l'air atmosphérique, et fait monter en même temps que lui le piston C. L'air contenu au-dessus de ce second piston, et qui s'y est précédemment introduit par la soupape *e*, est comprimé et refoulé dans le réservoir F par la soupape *e* : en sorte que le réservoir perd d'un côté une portion de l'air qu'il renfermait, et en gagne d'un autre côté une quantité égale, ce qui entretient une pression constante à son intérieur. Lorsque les deux pistons A, C, se sont ainsi élevés jusqu'à la partie supérieure de leur course, la soupape *b* se ferme, et la soupape *f* s'ouvre ; l'air contenu au-dessous du piston A peut donc se rendre dans l'atmosphère, en traversant les toiles métalliques G en sens contraire du sens dans lequel il les avait traversées précédemment. Alors les pistons A, C, redescendent en vertu de leur propre poids, ou bien par l'action de contre-poids disposés pour cela : en même temps la soupape *e* se ferme et la soupape *c* s'ouvre, de sorte que le haut du cylindre B se remplit d'air atmosphérique venant par cette dernière soupape. Lorsque les pistons A, C, sont arrivés au bas de leur course, la soupape *f* se ferme, la soupape *b* s'ouvre, et le jeu de la machine recommence comme précédemment.

On voit que cette machine est à simple effet ; la force élastique de l'air ne sert qu'à pousser la tige E de bas en haut, et ne contribue en aucune manière à la faire redescendre. Mais deux machines de ce genre, agissant alternativement aux deux extrémités d'un même balancier, le font mouvoir en définitive de la même manière qu'une machine à double effet agissant sur une seule de ces deux extrémités.

L'expérience a déjà montré d'une manière incontestable que, à

fait un très grand progrès
l'état d'enfance, et il est probable qu'il
des perfectionnements qui augmenteront notablement
stages qu'elle présente déjà.

6. **Bateaux à vapeur.** — La première idée d'appliquer la
à la navigation est due à Papin. Il l'a développée dans un
ge imprimé en 1693, en indiquant un moyen de transformer
vement rectiligne alternatif d'un piston, en un mouvement de
on continu de l'arbre qui porte à ses extrémités les roues
antes ou roues.

En 1775, Pèrier construisit à Paris le premier bateau auquel on
ent d'appliquer la vapeur. Ce bateau ne servit qu'à faire des
ériences.

En 1781, Jouffroy établit sur la Saône un bateau à vapeur qui
igua réellement pendant quelque temps.

Mais ce n'est qu'en 1807 que l'on trouve le premier bateau à va-
or auquel on n'ait pas renoncé après l'avoir essayé. Ce bateau
t construit par Fulton à New-York (Amérique), et fut employé au
ansport des voyageurs et des marchandises. Quelques années
près, en 1812, un bateau du même genre fut mis en activité en
ngleterre. Depuis cette époque, la navigation à la vapeur a fait
les progrès immenses, et a pris un développement considérable.

La disposition adoptée, pour appliquer la force de la vapeur à la
production du mouvement du bateau, est facile à comprendre, d'a-
près ce que nous avons dit des machines à vapeur. Il suffit en effet
de transformer le mouvement de rota-
tion des deux extrémités

aire d'une manivelle (§ 430); lorsque l'une des manivelles ée de manière que le piston qui lui correspond ne puisse e que peu d'effet, l'autre, au contraire, se trouve dans des ns convenables pour que le second piston développe toute on.

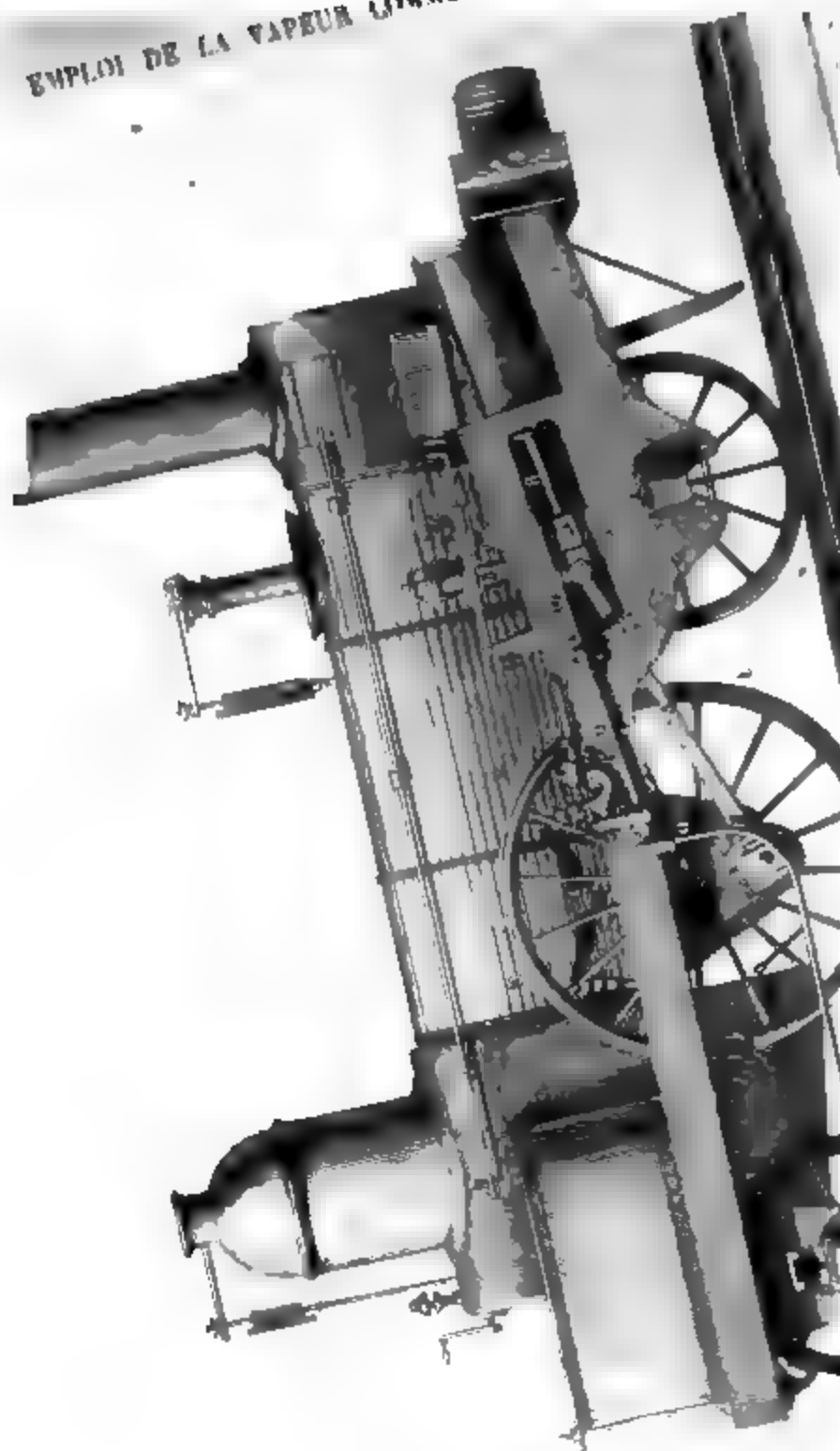
1. **Locomotives.** — L'invention des locomotives, dont on se r trainer les convois de wagons sur les chemins de fer, est cente. Cependant les essais auxquels on s'est livré pour re des voitures mues par la vapeur remontent jusqu'à 1769. A cette époque, un ingénieur français, Cugnot, con- ine voiture à vapeur destinée à marcher sur les routes ordi- Les expériences faites sur cette voiture réussirent, en ce o la vapeur la mettait en mouvement sur le sol, et lui don- vitesse d'environ 4 kilomètres par heure; mais ce mouve- pouvait s'entretenir que peu de temps, parce que la chau- était pas capable de fournir assez de vapeur pour la nation de la machine.

avons dit (§ 436) qu'une chaudière ne pouvait fournir une donnée de vapeur, dans un temps déterminé, qu'autant urface de chauffe avait une étendue suffisamment grande. ifficulté de satisfaire à cette condition, dans la construction audière portée par la voiture elle-même, qui a fait que les ssais auxquels on s'est livré sont restés longtemps sans On ne pouvait pas parvenir à donner à la surface de chauffe audière une étendue qui fût en rapport avec la grande de vapeur que nécessite la marche rapide d'une locomotive. qu'en 1828 que ce problème fut résolu de la manière la reuse par M. Séguin. La forme qu'il a imaginée pour les es des locomotives est celle qu'on leur donne encore main- Nous verrons en quoi consiste cette forme, en donnant la on complète d'une locomotive.

. La *fig. 529* représente une des locomotives du chemin de ris à Rouen; la *fig. 530* en est une coupe longitudinale. . 532 et 533 en sont des coupes transversales faites aux rémités.

cylindres A, *fig. 529*, sont placés à l'avant de la locomotive, aque côté. Ces deux cylindres sont ici légèrement inclinés; ivent ils sont placés horizontalement. Un piston se ment cun de ces deux cylindres, et y reçoit l'action de la vapeur, ir une de ses faces, tantôt sur l'autre. Cela constitue donc é deux machines à vapeur à double effet, comme dans les à vapeur (§ 446). La tige B de chaque piston est dirigée

EMPLOI DE LA VAPEUR COMME MOTIF



on mouvement par les glissières a, a , fixées à son extrémité. La tige est articulée à une bielle C , qui saisit un bouton D fixé à des roues motrices E : ce bouton, situé à une certaine distance du centre de la roue, fait fonction de manivelle. On conçoit donc que le mouvement de va-et-vient du piston détermine le mouvement de rotation des roues motrices. Les deux manivelles, sur lesquelles agissent les deux pistons, sont d'ailleurs disposées à droite l'une sur l'autre, comme cela a lieu dans les bateaux à vapeur (§ 446), et pour le même motif.

La distribution de la vapeur dans le cylindre se fait au moyen de tiroirs mus par des excentriques circulaires que porte l'essieu des roues motrices. Le mécanisme de la distribution se voit en partie sur la *fig. 530*. L'excentrique F donne un mouvement de va-et-vient à la bielle G : cette bielle se termine en b par une encoche qui saisit l'extrémité inférieure d'un levier H , *fig. 529* ; ce levier, mobile sur son milieu, prend un mouvement d'oscillation, par suite de la liaison à l'excentrique, et donne lieu au mouvement de va-et-vient de la tige K du tiroir qui est contenu dans la boîte à vapeur L . La locomotive devant pouvoir marcher à volonté dans un sens ou dans l'autre, il est nécessaire que le mécanicien ait à sa disposition la possibilité de modifier la distribution de la vapeur, de manière à faire marcher tantôt la machine en avant, tantôt la machine en arrière. Il est aisé de voir ce qu'il faut faire pour cela. Lorsque l'un des tiroirs se trouve au milieu de sa course, la vapeur doit le presser sur sa face antérieure ou sur sa face postérieure, suivant que la locomotive marche dans un sens ou dans l'autre ; dans l'un de ces cas, le tiroir doit se trouver vers l'une des extrémités de la boîte à vapeur ; et dans l'autre cas, il doit se trouver vers l'extrémité opposée. On voit donc que, pour changer le sens de la marche, il faut faire conduire le tiroir par un second excentrique, qui sera placé autrement que le premier sur l'essieu des roues motrices. On peut pour cela que cet essieu porte deux excentriques F, F' , pour mettre en mouvement chacun des tiroirs. Les bielles G, G' , mues par ces excentriques, se terminent par deux encoches b, b' , tournées dans des sens contraires, et destinées à saisir l'une ou l'autre l'extrémité inférieure du levier vertical H . Un levier coudé mobile autour du point d , sert à soutenir les encoches b, b' , à une hauteur convenable, au moyen de deux tringles qui partent d'un point e . Une longue tringle f , articulée à l'extrémité c de ce levier, peut se terminer à la portée du mécanicien, qui, en la tirant, ou en la poussant, peut ainsi faire saisir le bras de levier H par l'encoche b , ou par l'encoche b' .

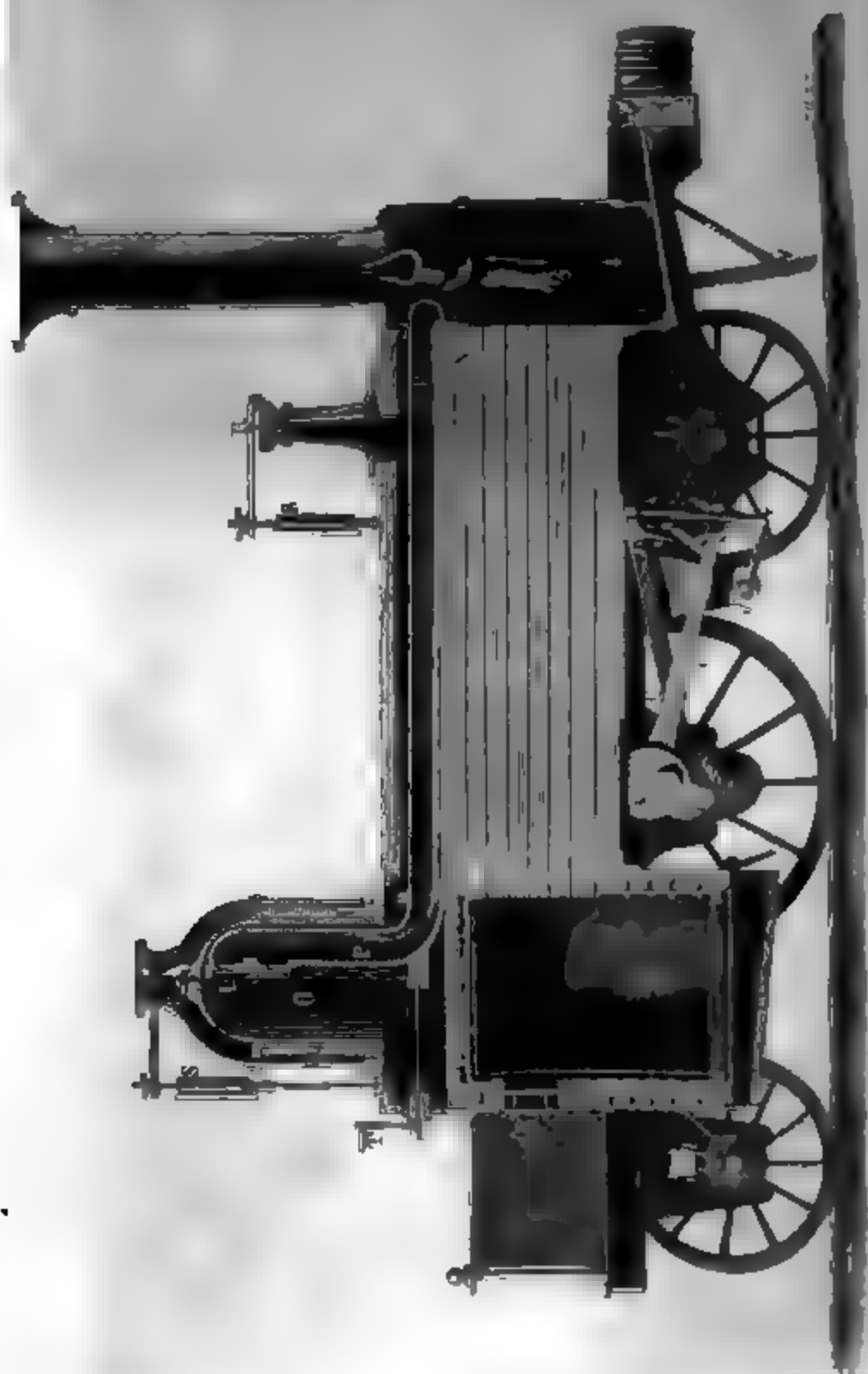


Fig. 210.

n qui vient d'être indiqué, pour changer à volonté marche d'une locomotive, est celle qui avait été abord. Elle est généralement remplacée par une n, fig. 531, qui n'est qu'une simple modification de ns qui présente de grands avantages. Au lieu que d'excentriques G, G', portent à leurs extrémités b, b', fig. 530, destinées à saisir l'une ou l'autre le crémélaire duquel le mouvement de va-et-vient est tir, on a réuni les extrémités de ces bielles par une . 531, dans laquelle s'engage ce bouton m. La cou-

ainsi dire,
 i réunion
 hes, dont
 ieux d'allor
 our pou-
 acilement
 voir, s'al-
 traire en
 es, de ma-
 sans dis-
 extrémité
 ux bielles
 e l'autre.
 de modi-
 comprend
 eut chan-
 la marche
 e, en éle-
 nt les ex-
 ux bielles
 , par le
 ior coudé
 ngle f, on
 indre que
 e soit pas-
 ement par
 la bielle
 on veut le
 tion. Mais
 coulisse
 avantage



Fig. 531.

avantage
 rtant. Si on le soulève ou qu'on l'abaisse, de ma-

niero que le bouton *m* soit à l'une ou à l'autre de ses extrémités le tiroir ne reçoit son mouvement de va-et-vient que de l'un des deux excentriques, de celui dont la bielle aboutit directement au bouton *m*; la seconde bielle se met en faisant osciller la coulisse, sans qu'il en résulte aucune influence sur le mouvement du tiroir, qui s'effectue exactement de la même manière que si cette seconde bielle et la coulisse n'existaient pas. Mais si l'on ne donne pas tout à fait à la coulisse l'une des deux positions extrêmes que nous venons de considérer, si on la maintient à une hauteur telle que le bouton *m* se trouve à une certaine distance de l'une de ses extrémités, ce bouton recevra et transmettra au tiroir un mouvement de va-et-vient qui ne sera pas produit par un seul des deux excentriques; la coulisse, en oscillant sous l'action simultanée des deux bielles *G*, *G'*, fera mouvoir le bouton *m* autrement qu'il ne se mouvrait sous l'action d'une seule de ces bielles. Or on a reconnu qu'ainsi la vapeur agit avec un degré de détente différent suivant que le bouton *m* est dans telle ou telle position par rapport aux extrémités de la coulisse: l'emploi de cette coulisse permet donc de faire varier à volonté la détente de la vapeur, pendant que la locomotive est en marche, ce qui est un résultat des plus importants (§ 432). Pour produire la marche en avant, il faut que le bouton *m* soit dans l'une des deux moitiés de la coulisse, et pour la marche en arrière, il doit être dans l'autre moitié; on fait varier la détente dans l'un ou l'autre cas, en soulevant la coulisse de telle manière que le bouton *m* occupe des positions différentes dans chacune de ces deux moitiés. Le contre-poids *n* est destiné à équilibrer le poids de la coulisse et des deux bielles d'excentrique, afin que l'ensemble de ces pièces puisse être plus facilement maintenu à la hauteur voulu, suivant le sens dans lequel on veut faire marcher la locomotive et le degré de détente que l'on veut produire. La coulisse dont nous venons de faire connaître les avantages est habituellement désignée sous le nom de *coulisse de Stephenson*. L'ingénieur anglais Stephenson est le premier qui l'ait introduite dans la construction des locomotives.

Le foyer de la locomotive est en *M*. Le combustible, qui est ordinairement du coke, s'introduit par une petite porte *g*. Le foyer est entouré de tous côtés par deux enveloppes, entre lesquelles se répand une partie de l'eau de la chaudière; son fond supérieur est également recouvert d'une certaine épaisseur d'eau. La flamme, en quittant le foyer, traverse un grand nombre de tubes qui sont établis à côté les uns des autres, dans le sens de la longueur de la locomotive, et entre lesquels se trouve la plus grande partie de

vaporiser, les gaz qui résultent de la combustion se rassemblent dans un espace situé à l'avant de la locomotive, et s'échappent par la cheminée qui surmonte cet espace.

Fig. 532, qui est une coupe transversale faite dans le foyer, montre les extrémités des tubes, dont le nombre varie jusqu'à 100 et même 150, leur diamètre est de 4 à 5 centimètres. Cette disposition augmente la surface de chauffe et peut atteindre une valeur de 50 mètres carrés ; c'est cette circonstance qui permet à la locomotive de produire la plus grande quantité de vapeur qu'elle consomme dans sa marche rapide. Le corps de la chaudière consiste principalement en un cylindre horizontal N, au milieu duquel sont installés les nombreux tubes dont nous venons de parler. Un réservoir de vapeur O est placé immédiatement au-dessus du foyer. Un large tuyau A part du haut de ce réservoir, traverse la chaudière dans toute sa longueur, et se rend à l'extrémité antérieure de la locomotive, où il se divise en deux pour conduire la vapeur dans les cylindres. Lorsque la vapeur a cessé d'agir sur les pistons, elle s'échappe par deux tuyaux Q, dont la disposition est indiquée par la fig. 533, qui est une coupe transversale faite dans la partie antérieure de la locomotive. Ces deux tuyaux se réunissent à leurs extrémités, et débouchent au bas de la cheminée ; il en résulte que la vapeur, en traversant les cylindres, est lancée suivant l'axe de la cheminée, et est évacuée de vapeur, qui se reproduit ainsi à chaque instant, pendant la marche de la machine, active le tirage, et, par suite, la combustion dans le foyer.

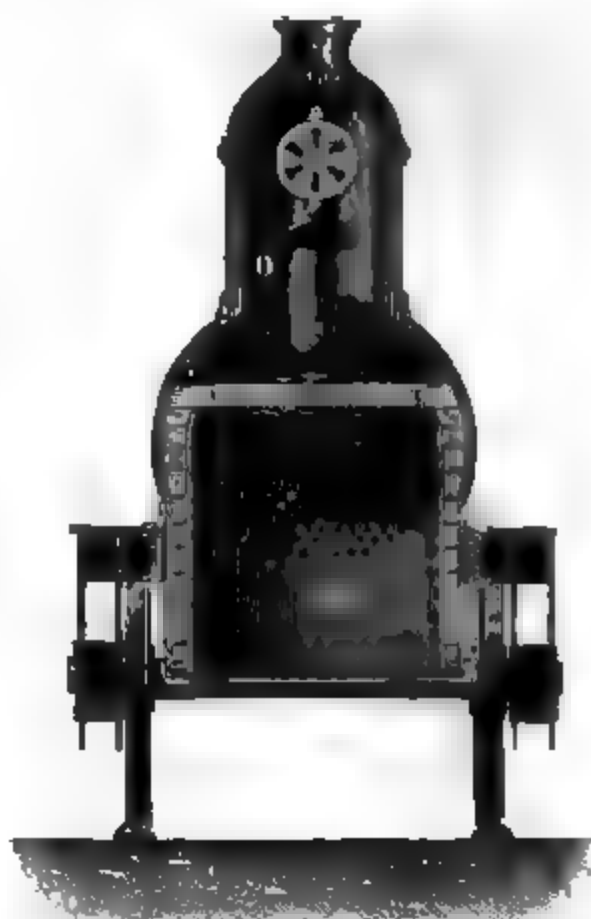


Fig. 532.

Deux soupapes de sûreté R, fig. 530, sont installées sur la chaudière, afin de s'opposer à ce que la tension de la vapeur ne dépasse la limite pour laquelle la chaudière a été construite. Les leviers qui pressent sur ces soupapes ne sont pas chargés de

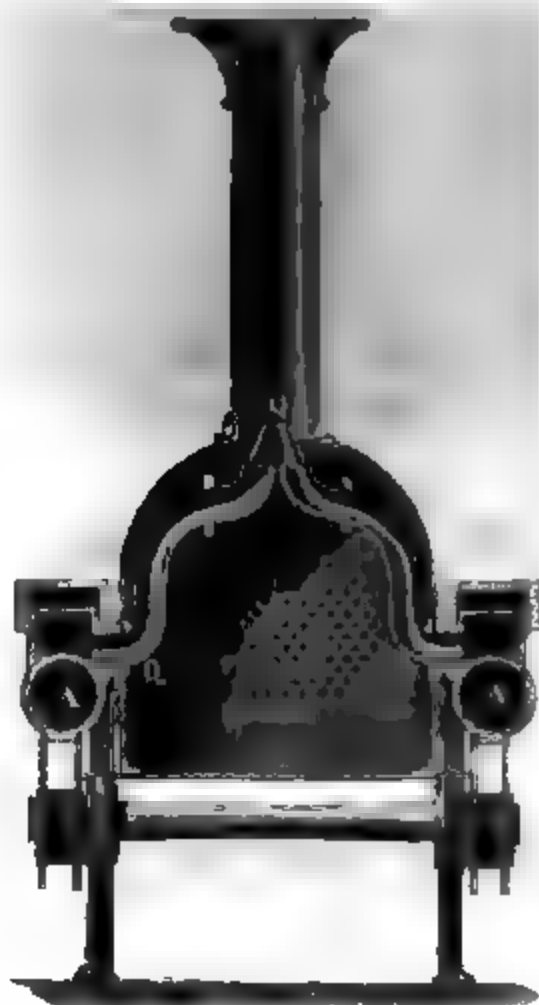


Fig. 533.

poids, comme dans les machines fixes, parce que les irrégularités qui se présentent toujours dans le mouvement gêneraient l'action de ces poids. Au lieu de cela, chacun de ces leviers est soumis, à son extrémité, à une force de traction produite par un ressort contenu dans une enveloppe S; et l'on règle la grandeur de cette force de traction en serrant convenablement l'écrou adapté à la tige qui part du ressort, et situé au-dessus du levier de la soupape.

La manivelle T, placée à la portée du mécanicien sert à ouvrir ou fermer l'entrée U du tuyau P, fig. 531 et 532. Lorsque la locomotive est arrêtée, il suffit de tourner cette manivelle, pour que la vapeur pénétrant dans le tuyau P, et par suite dans les cylindres, vienne

presser les pistons et mettre la machine en mouvement. Si l'on veut faire cesser l'action de la vapeur, on tourne cette manivelle en sens contraire, et le mouvement ne continue plus qu'en vertu de la vitesse acquise; dans ce cas les pistons se meuvent toujours dans les cylindres, par suite de leur liaison avec les roues motrices; mais ils n'exercent sur la marche de la locomotive qu'une action de résistance, en raison des frottements qu'occasionne leur mouvement.

La pièce V, que l'on voit à l'avant de la locomotive, fig. 529 et 530, est destinée à débarrasser les rails des obstacles qu'ils pourraient s'y trouver accidentellement, et qui pourraient occa-

in déraillement. Cette pièce porte le nom de *chasse-pierre*. L'agon spécial, auquel on donne le nom de *tender*, suit toute locomotive, et lui sert de réservoir pour l'eau et le combustible. Dans le tender que l'eau est constamment puisée par les alimentaires de la machine, pour être introduite dans la chaudière, et y entretenir un niveau constant. Chaque piston moteur locomotive fait mouvoir une pompe alimentaire, dont on voit la position complète sur la *fig. 529*. La tige *m* du piston de cette pompe est attachée à l'extrémité de la tige du piston moteur. Le mouvement de va-et-vient de ce dernier piston détermine en conséquence un mouvement analogue du premier, dans le petit corps de pompe *n*. L'eau du tender se trouve ainsi aspirée, par le tuyau *o*, et refoulée par le tuyau *p*, qui la conduit à l'intérieur de la chaudière. Des soupapes sont installées dans ces deux tuyaux, de manière que le fluide du corps de pompe *n*, de manière à permettre à l'eau de passer dans le sens que nous venons d'indiquer, et à s'opposer à ce qu'elle prenne le mouvement contraire.

EMPLOI DE L'ÉLECTRICITÉ COMME MOTEUR.

9. Ce n'est que depuis un petit nombre d'années qu'on a le moyen d'employer l'électricité comme force motrice. Les machines que l'on a imaginées pour cela est jusqu'à présent extrêmement restreint ; mais nous n'en devons pas moins connaître le principe, tant parce qu'on y voit une application ingénieuse des progrès des sciences, que parce que ce genre de machines est peut-être destiné à prendre une place importante parmi les machines dont se sert l'industrie.

Il nous devons naturellement nous occuper tout d'abord d'indiquer le moyen que l'on a imaginé pour développer une force à l'aide de l'électricité. Nous verrons ensuite quel parti on a pu, jusqu'à présent, tirer de cette force.

1. **Électro-aimant.**—Supposons que l'on prenne un morceau de fer doux, ayant par exemple la forme d'un cylindre, et qu'on enroule autour de lui un fil métallique enveloppé de soie, en lui faisant faire un grand nombre de tours. Si l'on vient à faire passer dans ce fil métallique un courant d'électricité produit par une pile, le cylindre de fer doux se trouve immédiatement transformé en aimant ; l'aimantation disparaît aussitôt que le courant électrique cesse de passer.

On peut courber le morceau de fer, pour lui donner la forme d'un cheval, comme on le voit sur la *fig. 534*. Lorsque le courant électrique est établi, l'aimant artificiel *AA* se trouve avoir ses

deux pôles rapprochés l'un de l'autre ; et l'on peut les mettre en contact avec un second morceau de fer B, supportant un poids qui est ainsi soutenu par l'aimant, si son énergie est suffisante. Des



Fig. 634.

qu'on supprime le courant électrique, la force qui supportait la pièce B est anéantie, et cette pièce tombe.

Un morceau de fer doux, déposé comme nous venons de le dire, au milieu d'un grand nombre de spires d'un fil métallique enveloppé de soie, prend le nom d'*électro-aimant*. Souvent un électro-aimant, au lieu d'être un cylindre de fer courbé en fer à cheval, est formé de deux cylindres de fer placés à côté l'un de l'autre,

et réunis à l'une de leurs extrémités par une pièce de fer transversale qui leur est fixée.

§ 451. **Télégraphe électrique.** — L'invention toute récente et si merveilleuse du télégraphe électrique est fondée sur la propriété de l'électro-aimant de prendre et de perdre l'aimantation avec une extrême rapidité, suivant qu'on établit ou qu'on interrompt le courant électrique, lors même que la longueur du fil dans lequel passe ce courant est très considérable. Il est aisé de concevoir en effet comment on peut utiliser cette propriété, pour déterminer presque instantanément la production de divers signes à une très grande distance.

Imaginons pour cela qu'une pile soit établie à Paris, par exemple qu'un fil métallique parte du pôle positif de cette pile, et aille jusqu'à Rouen ; que là ce fil s'enroule un grand nombre de fois autour d'un morceau de fer disposé en fer à cheval, de manière à constituer un électro-aimant, et qu'enfin le fil revienne à Paris, pour se réunir au pôle négatif de la pile. Il suffira d'établir et d'interrompre successivement le courant à Paris, pour produire et supprimer aussitôt l'aimantation de l'électro-aimant situé à Rouen. Supposons de plus que l'on ait disposé, tout près des pôles de cet électro-aimant, un morceau de fer doux qui soit mobile, de manière à pouvoir se mettre en contact avec ces pôles, et qui en soit cependant écarté par un léger ressort. Au moment où l'on établira le courant électrique à Paris, ce morceau de fer sera attiré par l'aimant, et viendra se mettre en contact avec lui, en faisant céder le petit ressort qui le retient : aussitôt que l'on interrompra le courant, l'aimantation disparaîtra, et le morceau de fer doux n'étant plus attiré,

à l'action du ressort qui tend constamment à l'éloigner de l'électro-aimant. En établissant et interrompant successivement plusieurs fois de suite le courant à Paris, on donnera lieu à un mouvement de va-et-vient de la pièce de fer, qui est en présence de l'électro-aimant à Rouen, et l'on pourra se servir de ce mouvement pour produire les signes qu'on voudra. Tel est le principe de la télégraphie électrique.

Les appareils destinés à appliquer ce principe sont très divers. Nous décrirons, comme exemple, le télégraphe à cadran, qui est le plus employé. La *fig. 535* représente un télégraphe de ce genre imaginé spécialement par M. Froment, de manière à en faciliter la construction. Le cadran de droite est installé dans le lieu où se trouve la pile qui fournit l'électricité; celui de gauche est placé dans un second lieu, avec lequel on veut correspondre. Les deux aiguilles *a*, *b* sont en communication avec les deux pôles de la pile, le premier *a* avec le pôle positif, et le second *b* avec le pôle négatif. Lorsque le courant est établi, il part du pôle positif, passe par le premier appareil, et vient se rendre dans le montant métallique *c*; de là il traverse la roue *d*, descend par le montant *e*, et quitte le premier appareil par le fil *f*. Ce courant pénètre dans le second appareil par le fil *g*, suit ce fil qui s'enroule autour d'un électro-aimant situé en dessous, vient passer en *g*, puis retourne en traversant la pièce *h*, quitte le second appareil par le fil *k*. Enfin il revient en *k'* dans le premier appareil, traverse la pièce *l*, et aboutit au pôle négatif de la pile par le fil *b*.

Pour établir et interrompre successivement le courant, il suffit de faire tourner la roue *d*, en saisissant le bouton *m* qui porte l'aiguille fixée à son axe. Cette roue est garnie de dents qui viennent successivement rencontrer des espèces de cames fixées aux extrémités des montants *c*, *e*; elle ne peut tourner qu'autant que ses dents repoussent les cames, en faisant fléchir les pièces *c*, *e*. Les cames sont disposées de manière que la roue *d* touche toujours la came *c* par une de ses dents, quelle que soit la position qu'on lui donne; tandis que la came de la pièce *e* se trouve entre deux dents de la roue *d*, sans toucher ni l'une ni l'autre, chaque fois que l'aiguille correspond à une des lettres que porte le cadran. Il résulte que le courant électrique ne passe pas le long du fil, que l'aiguille est arrêtée sur une des lettres, puisqu'il y a toujours une continuité entre la roue *d* et le montant *e*. Lorsqu'on fait tourner l'aiguille, pour l'amener d'une lettre à la suivante, de la lettre X à la lettre Y par exemple, une des dents de la roue vient toucher la came de la pièce *e*, puis l'abandonne presque aussitôt; ce contact



FIG. 330.

au moment où l'aiguille correspond au trait qui sépare les lettres, et le courant s'établit en conséquence ; le courant est interrompu, lorsque l'aiguille est arrivée sur la lettre Y. maintenant comment les alternatives d'existence et d'absence du courant électrique peuvent faire mouvoir l'aiguille du cadran, de manière à lui donner toujours la même position la première, c'est-à-dire à la faire toujours correspondre à la lettre. Tout près de l'électro-aimant A, *fig. 536 et 537*, installé en arrière du cadran de gauche, se trouve une pièce destinée à être attirée par l'aimant, chaque fois que le courant électrique est établi. Cette pièce de fer est fixée à un levier mobile autour du point C. Une petite lame de ressort au même levier CD, est pressée sur sa face supérieure par une vis, qui lui donne ainsi une tension suffisante pour le morceau de fer B de l'électro-aimant, lorsque le courant existe pas ; mais la tension de ce ressort n'est pas assez forte pour s'opposer à ce que le morceau de fer B vienne toucher l'aimant au moment où le courant existe. Les alternatives d'existence et d'absence du courant donnent lieu ainsi à un mouvement va-et-vient de la pièce de fer B, et par suite du levier CD, ce mouvement se transmet, par la tige DF, au levier mobile autour du point G. Ce dernier levier se divise en deux branches dont les extrémités H, K, portent chacune une petite tige disposée de manière à pouvoir s'engager entre les dents d'un rochet J, qui est fixée à l'axe de l'aiguille. Supposons que les aiguilles des deux cadrans correspondent toutes deux à la lettre X. D'après ce que nous avons dit, le courant électrique sera interrompu ; la pièce de fer B sera écartée de l'électro-aimant ; l'action du ressort E, *fig. 536* ; et la petite cheville K sera au fond de l'angle formé par deux dents de la roue J. Cette roue Jène l'aiguille du premier cadran sur le trait qui sépare la lettre X de la lettre Y, le courant s'établira ; la pièce B sera attirée par l'électro-aimant ; la cheville H sera poussée vers la droite en glissant sur la partie oblique d'une des dents de la roue J, et la fera tourner de manière à amener également l'aiguille du second cadran sur le trait qui sépare les lettres X de la lettre Y. *fig. 537*. Si l'on continue le mouvement de l'aiguille du premier cadran, et qu'on l'amène sur la lettre Y, le courant sera interrompu ; le petit ressort E entraînera le levier CD ; et la cheville K en glissant à son tour sur la partie oblique d'une des dents de la roue J, placera la seconde aiguille sur la même lettre Y. Donc que, si l'on fait tourner la première aiguille en lui



Fig. 536.

pour transmettre les lettres de l'alphabet par des signes plus expéditifs dont la signification est convenue d'avance en sorte qu'on peut de cette manière transmettre des dépêches avec une extrême rapidité.

Nous avons dit que le courant électrique quitte le premier appareil en *f*, fig. 535, et pénètre dans le second en *g*; puis qu'il sort du second appareil en *k*, et qu'il rentre dans le premier en *h*. On avait établi d'abord deux fils conducteurs allant

et dans les deux sens. Il existe pour cela à chaque station des appareils comme ceux de la fig. 535 ; un pour envoyer les dépêches, et un autre pour les recevoir. On met alternativement l'un ou l'autre en communication avec l'un ou l'autre de ces appareils, de sorte que les dépêches doivent se transmettre dans un sens ou dans l'autre.

Machine électromotrice.

La machine électromotrice exerce une action électro-motrice sur un morse, et par là elle peut exercer deux actions : soit son mouvement peut être utilisé pour faire fonctionner divers mécanismes, soit elle peut vaincre les résistances qui s'opposent à son mouvement.

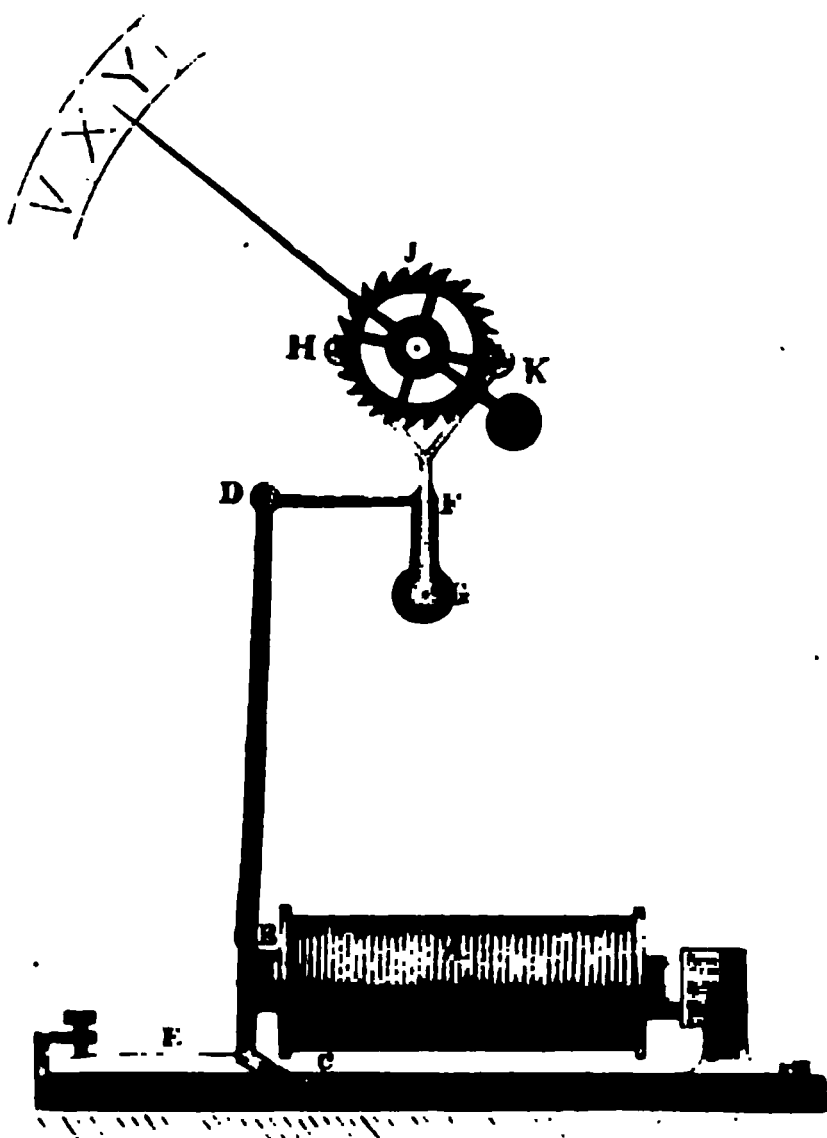


Fig. 537.

à la production du travail utile. Cette machine spéciale, qui n'a d'autre fonction que de servir d'intermédiaire entre l'électro-aimant et les mécanismes qu'il doit faire mouvoir, se nomme une *machine électro-*

En effet, un des premiers qui se soient occupés de ce genre de machines, a imaginé diverses dispositions toutes très ingénieuses. La machine que nous allons décrire, et qui est représentée par la figure 537, est celle qui a été construite pour la Faculté des sciences de Paris par M. Bourbouze. Dans cette machine quatre cylindres (B) dont deux sont cachés par les deux autres sur la figure.

394 EMPLOI DE L'ÉLECTRICITÉ COMME MOTEUR.

sont enveloppés par les spires nombreuses de fils métalliques recouverts de soie, qui doivent servir de passage au courant électrique. A l'intérieur de ces cylindres creux pénètrent, sans frottement, des cylindres de fer doux C, D, qui sont pleins. Les cylindres C, réunis à leur partie supérieure par une pièce transversale, également de fer doux, comme on le voit sur la *fig. 539*, sont suspendus à l'extrémité E du balancier EFG, au moyen d'une articulation. Les cylindres D sont de même suspendus au point G. Le mouvement communiqué aux pièces C, D, par l'action de l'électricité, ainsi que nous allons l'expliquer, donne lieu à des oscillations du balan-

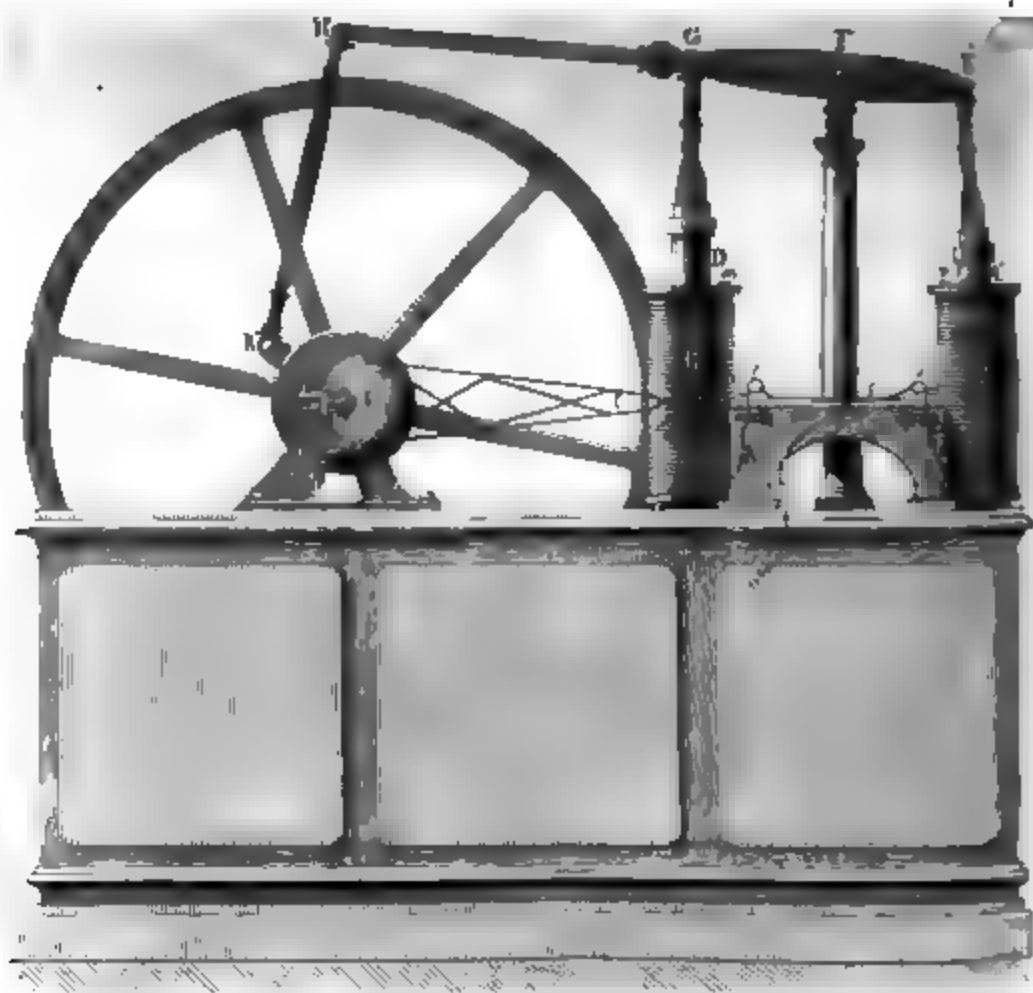


Fig. 538.

cier autour du point F. Ce balancier se prolonge jusqu'en H, et est relié en ce point à une bielle HK, qui saisit en K le bout d'une manivelle fixée à un arbre tournant. Le mouvement oscillatoire du balancier détermine ainsi la rotation de l'arbre; un volant

à cette rotation est destiné à en régulariser la vitesse. On comprend comment l'électricité peut mettre en mouvement les pièces C, D, examinons spécialement la *fig. 539*. On y voit deux cylindres de fer C, qui pénètrent à l'intérieur des cylindres creux A, jusque près du milieu de leur hauteur. D'autres cylindres, aussi de fer, remplissent la moitié inférieure du vide des cylindres A, et sont réunis l'un à l'autre par une barre de fer au-dessous d'eux. On a donc en réalité deux pièces C, C', dont chacune a la forme d'un fer à cheval, et les deux placées de manière à pouvoir se transformer sous l'influence du courant électrique qui circule tout autour des cylindres A. Par suite de la disposition adoptée, les deux aimants obtenus ont leurs pôles de noms contraires en premier lieu ; conséquemment ils s'attirent et tendent à se mettre en mouvement. L'aimant C'C' étant fixe, c'est l'aimant CC qui se met en mouvement, et qui abaisse ainsi l'extrémité E du balancier. Lorsqu'un certain moment est produit, le courant électrique cesse de passer autour des cylindres A ; les pièces CC, C'C' repassent à l'état de non-aimant et cessent de s'attirer. Mais, en même temps, le courant électrique recommence à passer autour des cylindres B ; la pièce de fer D se change en aimant et est attirée vers le bas de la même manière, ce qui détermine le mouvement du point G du balancier. Le courant électrique, qui produit cet effet, vient de nouveau passer autour des cylindres A, et ainsi de suite.

La machine elle-même qui fait fonctionner le courant électrique, tantôt autour des cylindres A, tantôt autour des cylindres B, produit cet effet, l'arbre qui reçoit un mouvement de rotation porte un excentrique *fig. 538*, qui donne un mouvement alternatif à une glissière *aa*, sur laquelle repose une lame métallique, formée d'une petite plaque *b*, est recouverte dans une certaine longueur d'une lame métallique. Un fil de cuivre *c* se recourbe à angle droit pour venir s'appuyer constamment sur cette pointe sur cette lame métallique malgré le mouvement de va-et-vient de la glissière ; elle reçoit de l'excentrique L la communication avec l'un des pôles de la pile par le fil conducteur *d*, qui pénètre en *o* dans le commutateur intérieur où elle est placée. Deux autres fils de cuivre *e, f*,

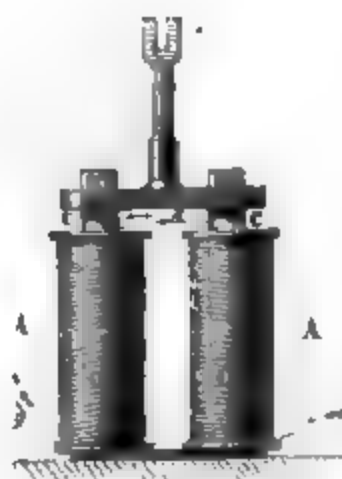


Fig. 539.

elle par le fil conducteur *d*, qui pénètre en *o* dans le commutateur intérieur où elle est placée. Deux autres fils de cuivre *e, f*,

s'appuient également par leur pointe sur la glissière *aa*, et communiquent, l'un avec le fil *g* qui vient des cylindres A, l'autre avec le fil qui vient des cylindres B. Le mouvement de va-et-vient de la glissière *aa* amène la plaque *b* alternativement sous le fil *e*, et sous le fil *f*; en

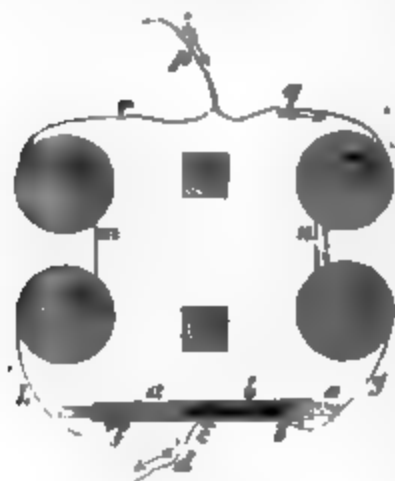


Fig. 540.

sorte que le fil *e* est mis ainsi en communication, tantôt avec le fil *g*, tantôt avec le fil *h*, par l'intermédiaire de la plaque métallique *b*. En nous reportant maintenant à la fig. 540, qui est une coupe horizontale de la partie de la machine dont nous nous occupons, nous verrons que le courant électrique, qui vient de l'un des pôles de la pile par le fil *p*, et se rend à l'autre pôle par le fil *d*, peut suivre pour cela deux chemins différents, suivant la position qu'occupe la glissière *aa*. Dans la position qu'indique la figure pour cette

pièce, le courant va de *p* en *q*, il tourne en montant autour d'un premier cylindre A; il se rend par le fil sur le second cylindre A, autour duquel il tourne en descendant; il quitte ce second cylindre par le fil *g*, va de *e* en *c* par la plaque métallique *b*, et arrive enfin au fil *d*. Le passage par les cylindres B est interrompu, parce que les parties *f*, *c*, de ce passage ne sont réunies que par une portion de la plaque d'ivoire *a*, et que l'ivoire est un mauvais conducteur. Lorsque par suite de la rotation de l'arbre, l'excentrique amène la plaque métallique *b* sous le fil *f*, l'électricité passe par les cylindres B, et ne passe plus par les cylindres A.

M. Froment emploie ses machines électro-motrices pour faire mouvoir des machines à diviser, et s'en sert notamment pour diviser les limbes de cercles destinés à la mesure des angles. Il arrive de cette manière à des résultats d'une précision extraordinaire, et cette grande précision est due en partie à la régularité avec laquelle fonctionnent ses machines motrices. Les machines électro-motrices n'ont pas encore reçu jusqu'à présent d'application en grand dans l'industrie. La plus forte machine de ce genre que M. Froment ait construite a la force d'un cheval.

TABLE DES MATIÈRES.

| | |
|--|---|
| . - Rappel des propriétés générales des corps. | 1 |
|--|---|

PREMIÈRE PARTIE.

| | Pages. | | Pages. |
|-----------------------------|--------|--|--------|
| générales sur le | | Équilibre d'un corps pesant qui ne | |
| t | 5 | peut que tourner autour d'un axe | |
| de, vitesse | 7 | horizontal | 37 |
| | 8 | Horloge magique. | 38 |
| tion, vitesse angu- | | Étude de diverses machi- | |
| | 8 | nes, sous le point de vue | |
| générales sur les | | de l'équilibre des forces | |
| | 9 | qui leur sont appliquées | 39 |
| c | 9 | Pression d'un levier sur son point | |
| | 10 | d'appui | 39 |
| | 11 | Balance | 40 |
| | 11 | Sensibilité d'une balance | 42 |
| dynamomètres. | 13 | Méthode des doubles pesées. | 43 |
| ce. | 14 | Balance de Quintenz | 44 |
| des forces | 15 | Balance romaine | 45 |
| ntes | 15 | Peson | 46 |
| | 15 | Poulie | 47 |
| ulibre instable | 16 | Moufle | 48 |
| vant une même di- | | Tour ou treuil | 49 |
| | 16 | Cabestan | 50 |
| | 17 | Roue à chevilles | 52 |
| | 21 | Courroie sans fin | 54 |
| un point, dans di- | | Roues dentées, ou engrenages | 56 |
| | 24 | Cric | 59 |
| gravité d'un | | Chèvre | 60 |
| | 28 | Grue | 63 |
| de gravité | 28 | Plan incliné | 68 |
| imentale du centre | | Haquet | 71 |
| | 29 | Coin | 72 |
| d'un corps homo- | | Équilibre des cordes ou chaînes qui sup- | |
| | 30 | portent des corps pesants. — Suspen- | |
| d'une surface | 31 | sion d'une lanterne | 73 |
| d'un corps formé | | Chaîne des ponts suspendus | 75 |
| de plusieurs autres | | Étude des machines à l'état | |
| | 32 | de mouvement uniforme | 77 |
| is pesant qui repose | | Ce qu'on gagne en force on le perd en | |
| ontal | 33 | vitesse | 78 |
| es par les points | | Presse à vis | 83 |
| | 35 | Vis sans fin | 84 |

| | Page. | | Page. |
|---|------------|---|------------|
| Travail différentiel | 84 | Effets des volants | 184 |
| Travail des forces | 86 | Influences des résistances passives | 185 |
| Unité dynamique, kilogrammètre | 89 | Moyens de diminuer cette influence | 186 |
| Travail moteur, travail résistant | 89 | tourillons, galets | 186 |
| Égalité du travail moteur et du travail | 90 | Moyens d'augmenter cette influence | 187 |
| résistant | 90 | freins | 187 |
| Production et modification | | Frottement d'une corde sur un cylin- | 188 |
| du mouvement par | | dre fixe | 188 |
| les forces | 91 | Perte de travail occasionnée par les | 189 |
| Chute des corps | 92 | chocs | 189 |
| Plan incliné de Galilée | 94 | Conséquences générales de ce qui | 190 |
| Machino d'Atwood | 95 | précède | 190 |
| Lois de la chute des corps | 97 | Application des principes | |
| Appareil de M. Marin | 104 | précédents à l'étude de | |
| Mode d'action des forces pour pro- | 107 | quelques machines | 191 |
| duire le mouvement | 107 | Descente, transport, et équilibre de l'é- | 192 |
| Masse d'un corps, quantité de mouve- | 111 | lisque de Luxor | 192 |
| ment | 111 | Moulins à farine | 194 |
| Mouvement d'un corps pesant sur un | 111 | Scieries mécaniques | 194 |
| plan incliné | 111 | Marteaux de forges | 195 |
| Mouvement d'un corps pesant sur une | 114 | Hocards | 195 |
| ligne courbe | 114 | Sonnettes | 195 |
| Pendule | 115 | Machines qui servent à frapper les | 195 |
| Mouvement de l'escarpolette | 119 | monnaies | 195 |
| Mouvement curviligne d'un corps en- | 122 | Horlogerie | 195 |
| tièrement libre | 122 | Notions générales sur le | |
| Composition des vitesses | 123 | transport des fardeaux | 196 |
| Mouvement parabolique d'un corps pe- | 124 | Transport direct par l'homme ou les | 196 |
| sant | 124 | animaux | 196 |
| Mouvement des corps célestes | 130 | Transport par glissement | 196 |
| Mouvement circulaire, force centrifuge | 132 | Transport par roulement | 196 |
| Machine à force centrifuge pour sécher | 139 | Transport sur des roues | 196 |
| les tissus | 139 | Stabilité des voitures | 196 |
| Transmission du mouvement dans les | 142 | Tirage des voitures | 196 |
| corps | 142 | Transport sur un chemin incliné | 196 |
| Choc de deux corps | 146 | Chemins de fer | 197 |
| Choc des billes de billard | 154 | Wagons articulés de M. Arnoux | 197 |
| Transmission du mouvement produit | 158 | Changements de voie | 197 |
| par un choc | 158 | Traction par les locomotives | 197 |
| Des résistances passives | 158 | Freins employés sur les chemins de | 197 |
| Frottement | 159 | fer | 197 |
| Résistance au roulement | 164 | Plans inclinés automoteurs | 198 |
| Rouleur des cordes | 165 | Drops | 198 |
| Résistance des fluides | 166 | Considérations générales | |
| Étude des machines à | | sur les moteurs | 198 |
| l'état de mouvement | | Diverses espèces de moteurs | 198 |
| non uniforme | 168 | Machines motrices | 198 |
| Moteur du remorqueur | 168 | Frein dynamométrique | 198 |
| Des volants | 171 | Cheval-vapeur | 198 |
| Régulateur à force centrifuge | 173 | Moteurs à vapeur | 198 |
| <i>Transmission du travail dans une ma-</i> | | Mouvement perpétuel | 198 |
| <i>chine</i> | <i>175</i> | | |

DEUXIÈME PARTIE.

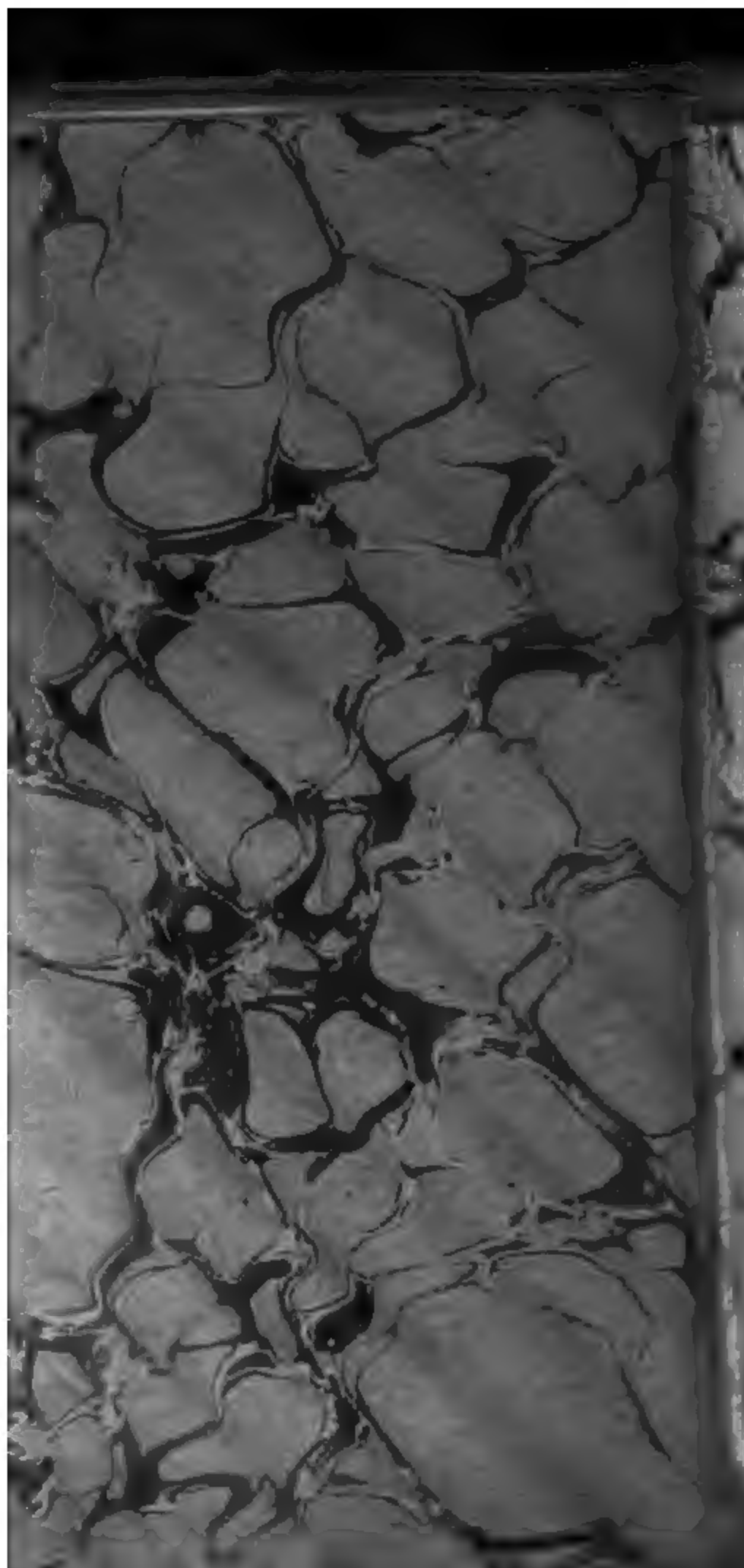
| Pages. | Pages. |
|--------------------------|--|
| Isa à l'équi- | Corps flottants 304 |
| des 311 | Mesure des densités 390 |
| stions dans un | Aréomètres 400 |
| 311 | Navigation 403 |
| nts d'une masse | Canaux 403 |
| le pression dans | Influence de l'air sur le poids d'un |
| 314 | corps 409 |
| des pesants . . 315 | Aérostats 410 |
| hydraulique . . 320 | Principes relatifs au mou- |
| de pesant . . . 321 | vement des fluides . . . 414 |
| ar les parois . . 323 | Écoulement d'un liquide par un ori- |
| de deux liquides 333 | fice. — Forme de la veine liquide . 414 |
| 334 | Effet des ajutages 422 |
| et forces quel- | Siphon 427 |
| connement de la | Écoulements constants 430 |
| 338 | Écoulements intermittents 430 |
| 342 | Fontaine de Héron 433 |
| ssants dans les | Mouvement des liquides dans des |
| 347 | tuyaux 434 |
| 348 | Effets des coudes et des étranglé- |
| pesants 350 | ments 439 |
| 352 | Jets d'eau 441 |
| 353 | Puits artésiens 443 |
| 356 | Mouvement de l'eau dans les canaux . 448 |
| 365 | Mouvement de l'eau dans les rivières . 451 |
| loi de Gay- | Mesure de la vitesse de l'eau 453 |
| 367 | Jaugeage d'un cours d'eau 456 |
| on atmosphé- | Écoulement d'un gaz par un orifice . 459 |
| rique relative à | Mouvement des gaz dans des tuyaux . 461 |
| les 368 | Mesure de la vitesse d'un courant d'air . 463 |
| avec pressions | Pression exercée par une veine liquide |
| des livres . . . 371 | sur une surface 464 |
| 373 | Pression supportée par un corps plongé |
| 375 | dans un liquide en mouvement . . 467 |
| 376 | Pression exercée sur un corps par un |
| niveau constant | gaz en mouvement 469 |
| ntenu dans un | Résistance de l'air à la chute des corps . 470 |
| 378 | Action du gouvernail, dans le mouve- |
| 379 | ment d'un navire 472 |
| 380 | Propulsion des navires à l'aide de ra- |
| males 381 | mes, de roues, ou d'hélices 473 |
| out les diverses | Cerf-volant 479 |
| à la même tem- | Navigation aérienne 480 |
| 383 | Machines qui servent à |
| 386 | élever les liquides . . . 483 |
| 388 | Chapelet 484 |
| 390 | Soma 485 |

TABLER DES MATIÈRES.

| | Page | | Page |
|--|------|--|------|
| Archimède | 486 | Sonfflets | 486 |
| Archimède | 487 | Machines soufflantes | 487 |
| Archimède | 490 | Ventilateurs | 490 |
| Archimède | 491 | Vie pneumatique | 491 |
| Archimède | 494 | Gagnardello | 494 |
| Archimède | 495 | Trompe | 495 |
| Archimède | 498 | Emploi du vent comme | |
| Archimède | 498 | moteur | |
| Archimède | 499 | Navires à voiles | |
| Archimède | 510 | Moulins à vent | |
| Archimède | 512 | Emploi de la vapeur | |
| Archimède | 513 | comme moteur | |
| Archimède | 515 | Propriété de la vapeur d'eau | |
| Archimède | 518 | Histoire de l'invention des machines | |
| Archimède | 519 | à vapeur | |
| Archimède | 522 | Machine à vapeur de Watt à simple | |
| Archimède | 533 | effet | |
| Emploi de l'eau comme | | Détente de la vapeur | |
| moteur | 537 | Machine à vapeur de Cornouailles | |
| Création d'une chute d'eau | 537 | Parallélogramme articulé | |
| Force d'une chute d'eau | 538 | Machine à vapeur de Watt à double | |
| Conditions que doivent remplir les mo- | | effet | |
| teurs hydrauliques | 538 | Pistons métalliques | |
| Roue ou dessous, à aubes planes | 541 | Excentrique triangulaire | |
| Roue à auge | 543 | Excentrique à denture | |
| Roue de côté | 546 | Détente Lapeyron | |
| Roue Poncelot | 548 | Machine de Woolf, à deux cylindres | |
| Roue plongeant dans un ou au la- | | détente variable | |
| deslu | 550 | Suppression du condenseur | |
| Roue à enlèvement | 551 | Avantage des machines à haute pres- | |
| Roue à cuve | 551 | sion | |
| Roues à réaction | 552 | Transmission du mouvement de rotation | |
| Turbine Fourneyron | 553 | à un arbre tournant | |
| Turbine Callon | 558 | Chaudières à vapeur, soupapes de sé- | |
| Turbine Fontaine | 559 | reté, manomètres, flotteurs | |
| Turbine Kœchlin | 561 | Indicateur de Watt | |
| Turbines hydropneumatiques | 562 | Détails économiques sur l'emploi de la | |
| Considérations générales sur l'établis- | | vapeur comme moteur | |
| sement d'une roue hydraulique | 564 | Machines à vapeurs combinées | |
| Machine à colonne d'eau à simple effet | 565 | Machine à air chaud d'Ericsson | |
| Machine à colonne d'eau à double effet | 572 | Bateaux à vapeur | |
| Relier hydraulique | 574 | Locomotives | |
| Machines qui servent à | | Emploi de l'électricité | |
| faire mouvoir les gaz | 578 | comme moteur | |
| Machine pneumatique | 579 | Electro-aimant | |
| Chemins de fer atmosphériques | 583 | Télégraphe électrique | |
| Machines aspirantes | 587 | Machine électro-motrice | |
| Machine de compression | 589 | | |

[illegible]

STANFORD UNIVERSITY LIBRARIES
STANFORD, CALIFORNIA 94305-6004



QA 807 .D42 1854 C.1
Cours elementaire de mecanique
Stanford University Libraries



3 6105 030 451 764

